

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geologie



Jozef Müller

Ohniskové mechanismy zemětřesení z vedlejších zdrojových oblastí
v západních Čechách

Focal mechanisms of earthquakes in the secondary focal zones
in West Bohemia

Bakalářská práce

Školitel: Martin Bachura, PhD.

Praha 2019

Prehlásenie

Prehlasujem, že som záverečnú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje a literatúru. Táto práca ani jej podstatná časť nebola predložená k získaniu iného alebo rovnakého akademického titulu.

V Prahe, 20.05.2019

Jozef Müller

PodĎakovanie

Týmto by som chcel vysloviť poĎakovanie Martinovi Bachurovi, PhD. Nielen za cenné rady a pripomienky, ale aj za ochotné poskytovanie študijných materiálov počas tvorby tejto práce. VĎaka patrí aj ďalším zamestnancom GFÚ Akademie věd ČR za dodanie dát zo seizmickej siete WEBNET.

Abstrakt

Štúdium seizmicity v regióne západných Čiech/Vogtlandu sa zameriava najmä na najaktívnejšiu Novokosteleckú zlomovú zónu, ktorá sa v posledných desaťročiach stala známou výskytmi zemetrasných rojov. Táto práca si kladie za cieľ sústrediť sa na vedľajšie, menej preskúmané zdrojové oblasti miestnych zemetrasení, nachádzajúcich sa západne od tejto hlavnej seizmoaktívnej zóny. Ich štúdium bolo založené na určovaní ohniskových mechanizmov pomocou polarít prvých príchodov P-vĺn (program FOCMEC) a následnej interpretácii. Analyzovaných bolo niekoľko desiatok zemetrasení, pričom spoľahlivo sa podarilo určiť ohniskové mechanizmy pre dvadsať z nich. Minimálny počet seizmogramov potrebných pre zisk dôveryhodného riešenia bol osem. Na základe týchto výsledkov bola zistená prítomnosť takmer výlučne horizontálnych pohybov, v jednom prípade dokonalo mapujúcich predpokladanú zlomovú plochu. Navyiac, v jednej lokalite sa na základe výsledkov z kategórie neistých podarilo indikovať poklesy.

Abstract

Recent research on earthquake swarms in West Bohemia (Czechia) has been focused on the Nový Kostel Focal Zone, where, during the last decades, majority of the earthquake swarms has been observed. In this work we focus on earthquake activity surrounding this fault zone. To this purpose we estimated focal mechanisms from P-wave of earthquakes located to the west of the Nový Kostel Focal Zone, using the FOCMEC software. Dozens of earthquakes have been analysed, of which 20 produced reliable focal mechanisms (with at least 8 favourably positioned stations used). The resulting mechanisms revealed dominance of horizontal movements, which agreed well with fault orientations mapped by earthquake relocations. Results also imply the existence of normal faulting in the studied region.

Obsah

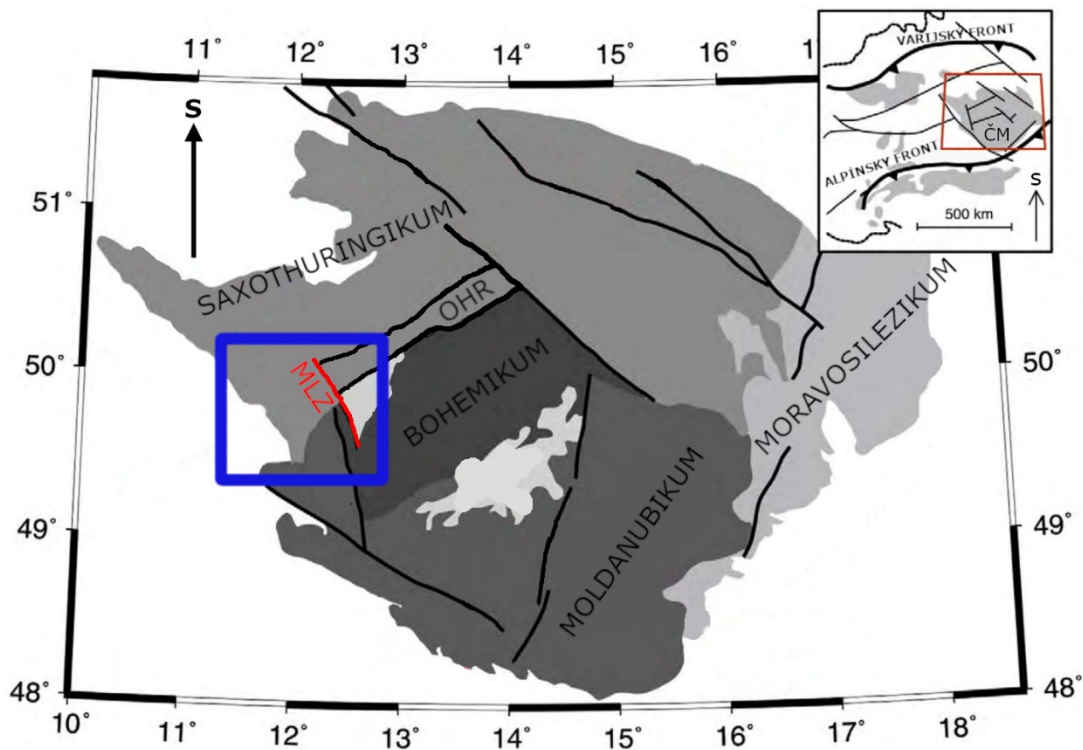
1	Geológia západných Čiech	2
1.1	Tektonika.....	2
1.2	Seizmická aktivita	5
1.3	Aktivita fluid	6
2	Ohniskové mechanizmy	7
2.1	Parametrizácia zlomovej plochy	7
2.2	Mechanizmy Novokosteleckej zlomovej zóny	11
3	Signál a základy jeho spracovania	13
3.1	Seizmický signál.....	13
3.2	Fourierova analýza	14
4	Dáta	16
4.1	Podoblasť A (stred)	18
4.2	Podoblasť B (východ)	19
4.3	Podoblasť C (juh).....	20
4.4	Podoblasť D (sever).....	22
5	Spracovanie	23
6	Metodika	25
7	Výsledky.....	26
8	Diskusia.....	29
9	Záver	32
10	Zoznam citovanej literatúry	33
11	Prílohy	36

1 Geológia západných Čiech

Záujmová oblasť leží na hranici dvoch štátov, a to Nemeckej spolkovéj republiky a Českej republiky, hlavne v územných jednotkách Krajinského okresu Vogtlandkreis a Západočeského kraja. Vyznačuje sa výraznou geodynamickou aktivitou, siahajúcou až do recentu. A to najmä v podobe neotektonických kôrových pohybov na zlomových zónach, terciérneho až kvartérneho vulkanizmu, seizmickej aktivity a prítomnosti fluid a minerálnych prameňov (Fischer et al., 2014). Zámerom tejto kapitoly je stručné predstavenie menovaných procesov.

1.1 Tektonika

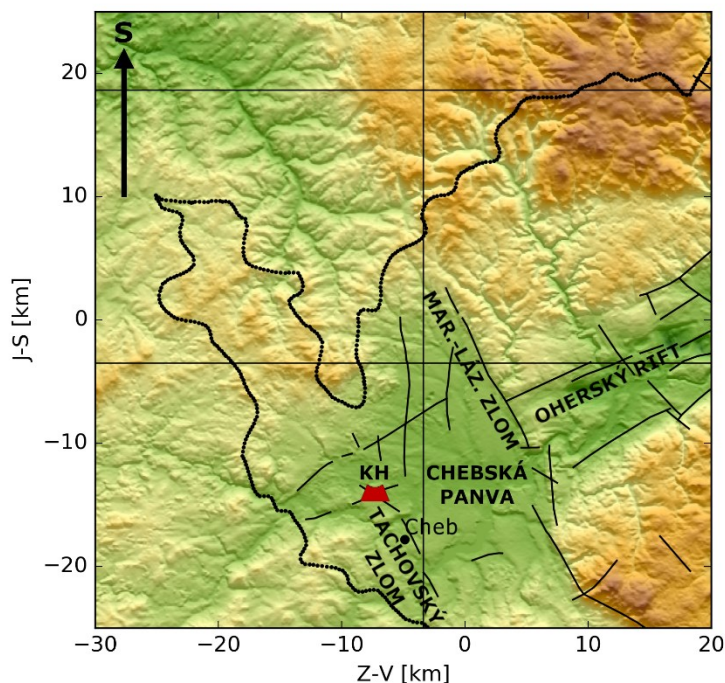
Región tvorí západnú časť Českého masívu, predstavujúceho najvýchodnejšiu súčasť varijského orogénneho pásma, ktoré sa sformovalo približne medzi 500 až 250 Ma, teda v období rozsiahlych konvergencií, kolízií, subdukcií kontinentálnych dosiek a mikrodosiek a postkolíznych extenzií (Matte et al., 1990). Oblasť sa nachádza na kontakte troch varijských štruktúr (Obrázok 1). Saxothuringikum na severozápade, bohemikom uprostred a moldanubikom na juhovýchode (Babuška et al., 2007).



Obrázok 1: Schematická mapa základných stavebných jednotiek Českého masívu, s vyznačením hlavných zlomových línií. Modrý obdĺžnik vymedzuje zónu s najvýraznejšími prejavmi geodynamickej aktivity. MLZ – mariánsko-lázeňský zlom, OHR – oherský rift (Fischer et al., 2014, upravené).

Medzi saxothuringikom a bohemikom s moldanubikom je prítomný paleozoický šev, reaktivovaný od doby na hranici kriedy-terciéru. To malo za následok vznik oherského riftu (Obrázok 2), ktorý je aktívnou súčasťou Európskeho kenozoického riftového systému, v celku pozostávajúceho z 1100 km dlhého pásu riftov, siahajúcich od Stredozemného mora až po Severné more. Oherský rift je orientovaný v smere SV-JZ, s rozmermi 300 x 50 km (Prodehl et al., 1995). Ďalšou významnou tektonickou štruktúrou v oblasti je mariánsko-lázeňský zlom so SSZ-JJV orientáciou, patriaci do Regensbursko-Lipsko-Rostockej zóny, orientovanej v smere J-S (Bankwitz et al., 2003).

Z hľadiska vulkanickej činnosti je významným tachovský zlom, tiahnuci sa v smere SZ-JV, pozdĺž ktorého sú známe štyri kvartérne vulkány. Troskové kužele Komorní hůrka a Železná hůrka, a dva explozívne krátery Mýtský maar a Neualbenreuthský maar (Hrubcová et al., 2017).



Obrázok 2: Prehľad hlavných štruktúrnych jednotiek v západných Čechách. KH – sopka Komorní Hůrka. Ostatné tri vulkány sa nachádzajú južne od zobrazenej oblasti.

Predmetná oblasť západných Čiech/Vogtlandu má stred približne na prieniku vyššie spomenutého oherského riftu a mariánsko-lázeňského zlomu. Západne od tohto kríženia sa nachádza chebská panva (Obrázok 2) s rozlohou 265 km², vyznačujúca sa výraznou recentnou geodynamickou aktivitou. Jej pôvod je spojený s vyššie spomenutou, terciérnou reaktiváciou starších varijských štruktúr (Bankwitz et al., 2003). Výplň tvoria 80-300 m mocné terciérne siliciklastické sedimenty. V horizontálnom smere možno hranice tejto panvy zo západu ohraničiť tachovským zlomom a z východu mariánsko-lázeňským zlomom, na ktorom leží hlavná seizmoaktívna zóna Nový Kostel. (Hrubcová et al., 2017).

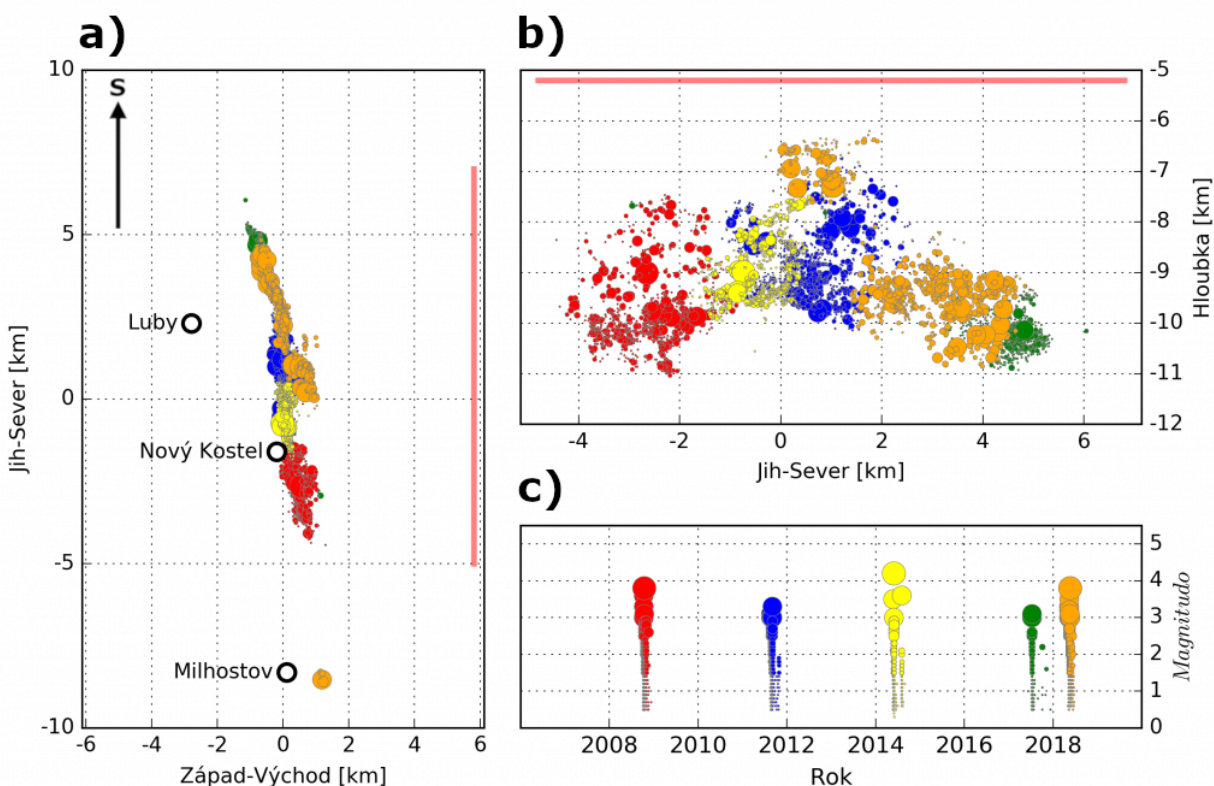
Spodná hranica litosféry, teda Moho, pod chebskou panvou podľa Hrubcovej et al. (2013) nepozostáva len z jednej vrstvy s ostrým rýchlostným kontrastom. Na základe analýzy odrazených vĺn v záznamoch mikrozemetrasení seizmického roja 2008 dospeli k záveru že sa jedná o viacvrstevnú prechodovú zónu s nezanedbateľnou mocnosťou a výraznou reflektivitou, čo možno považovať za súladné s predchádzajúcimi výskumami (napr. Hrubcová et al., 2005, Geissler et al., 2005, Heuer et al., 2006). Mocnosť takto vymedzenej zóny v spodnej kôre kolíše v rozpätí 2 až 4 km, v hĺbkovom rozmedzí od 27 do 31,5 km a pomer rýchlostí P a S vĺn bol odhadnutý na 1,73. Podotýkajúc, že získaná topografia Moho sa vzťahuje len na malú oblasť, Hrubcová et al. (2013) vyslovili mimo iného domnienku, že stenčená zóna Moho v smere SSV-JJZ môže byť spojená so západným zakončením oherského riftu, ktorý je orientovaný v podobnom smere, a to SV-JZ.

Naviac, Hrubcová et al. (2017) sa domnievajú, že na Moho spomenutej oblasti môže dochádzať k magmatickému „underplatingu“, teda zachytávaní a hromadeniu bazaltovej magmy na hranici plášťa a kôry pri jej výstupe na povrch, a to kvôli nízkemu vztlaku stúpajúcej taveniny voči okolitej hornine. Na základe štádia tuhnutia takto vmiesenej taveniny, autori v skúmanej zóne rozlíšili dve rôzne fázy tohto procesu: vrchnopaleozoický a kenozoický.

Vrchnopaleozoický underplating sa vyznačuje najmä vysokým rýchlostným gradientom (zvýšenie rýchlosti šírenia seizmických vĺn až na $6,9-7,5 \text{ km s}^{-1}$) a silnou odrazivosťou od vrchných polôh tohto telesa. Na základe týchto a ďalších faktorov sa jedná zrejme o staršiu, chladnejšiu intrúziu vrchnovarijského veku. Vrchnokenozoická až recentná fáza sa prejavuje v podobe výskytu telesa s vysokými rýchlosťami seizmických vĺn, ale nevykazuje ich odrazivosť. Môže sa teda jednať o ešte neutuhnutý magmatický krb (Thybo a Artemieva, 2013). Nad druhým spomenutým telesom dochádza naviac na zemskom povrchu k emanáciám fluid plášťového pôvodu (Hrubcová et al., 2017).

1.2 Seizmická aktivita

Región západných Čiech/Vogtlandu sa vyznačuje výskytom zemetrasných rojov, teda sledov veľkého počtu slabších, priestorovo koncentrovaných zemetrasení, pri ktorých nemožno identifikovať jeden dominantný otras. Trvajú dni až mesiace a každý roj zvykne aktivovať vždy inú časť zlomovej plochy (Fischer et al., 2014). Najstarší analyzovaný seizmický roj sa odohral v roku 1824 a pozostával z vyše 100 pocíiteľných zemetrasení (Knett, 1899). Nasledovali roje v rokoch 1897 (s približnou maximálnou makroseizmickou intenzitou $I_0 = 6,5$), 1900 ($I_0 = 5,5$), 1903 ($I_0 = 6,5$), 1908 ($I_0 = 7,0$) (Leydecker, 2011). Pre javy z rokov 1908 boli prvýkrát získané dostatočne kvalitné seizmické záznamy a z nich určené magnitúdo najsilnejšieho javu $M_L = 4,4$ (Neunhöfer a Hemmann, 2005).



Obrázok 3: Prehľad postmileniálnych seizmických rojov, ku ktorým došlo v Novokosteleeckej zlomovej zóne. (a) zobrazuje mapový pohľad, (b) poskytuje pohľad z východu na hĺbkový rez vedený v smere J-S, (c) ukazuje časový vývoj seizmicity. Veľkosť krúžku predstavuje magnitúdo zemetrasenia, jednotlivé roje sú rozlíšené farebne (prevzaté z <https://www.ig.cas.cz/vyzkum-a-vyuka/observatore/lokalni-seismicka-sit-webnet/zemetresne-roje-v-zapadnich-cechach-po-roce-2000/>).

Hlavným impulzom k vybudovaniu rozsiahlej siete seizmických staníc, monitorujúcich túto oblasť, bol výskyt roja v rokoch 1985/86, s najvyšším zaznamenaným magnitúdom $M_L = 4,6$. Táto sieť sa nazýva WEBNET, buduje sa od roku 1986 a v súčasnosti pozostáva z 25 staníc, z ktorých 15 je prístupných online. Väčšina staníc je vybených širokopásmovými seizmometrami Guralp so vzorkovacou frekvenciou 250 Hz.

Tieto stanice zaznamenávajú hodnoverný signál v pásme 0,03 až 80 Hz. Zvyšných 10 je tzv. dočasných a namerané dáta sa musia zbierať priamo na mieste. Síce po roji 1985/86 zatiaľ žiadny z nasledujúcich javov neprekonal magnitúdo $M_L = 4,6$, no čo sa týka počtu otrasov, tak aktivita intenzívne pokračuje. Istotne treba spomenúť roje 1997, 2000, 2008, 2011, 2014, 2017, 2018. V ďalších riadkoch bude bližšie opísaná aktivita od roku 2008, a to v lokalite Nový Kostel (Obrázok 3).

Ohniská tamojších javov migrujú v podobe zhlukov, ležiacich na osi SSZ-JJV orientácie. V horizontálnom smere, tvorí táto tzv. Novokostelecká zlomová zóna úzky pás o rozmeroch 12 x 2 km a pri pohľade do hĺbky sa hypocentrá pohybujú od 6 do 11 km, občasne až do 13 km pod povrchom (Obrázok 3). K prvému významnému postmileniálnemu roju došlo v roku 2008. Koncentroval sa v južnej časti, pričom hĺbka javov sa postupne znižovala z 11 do 8 km. Nastalo vyše 3500 zemetrasení o $M_L > 0,5$ (táto podmienka platí aj pri nižšie zmienených rojoch), pričom najsilnejšie dosiahlo $M_L = 3,8$. Počas nasledujúceho roja (2011) bola zaznamenaná aktivita zhruba uprostred zlomovej zóny, s nie menej ako 1800 otrasmi, s $M_L \text{ max.} = 3,6$. Aktivita 2014, charakteristická chovaním málo podobným tradičnému roju, pochádzala z takej časti zlomovej zóny, že, obrazne povedané, premostila oblasti hypocentier z rokov 2008 a 2011. Vyskytlo sa 2500 otrasov, s najvyšším $M_L = 4,4$. V roku 2017 bola aktivovaná doposiaľ najsevernejšia časť Novokosteleckej zlomovej zóny, a to vyše 800 otrasmi v hĺbkach 9,5 až 11 km, s $M_L \text{ max.} = 3,5$. V relatívne krátkom časovom slede nasledoval ďalší, doposiaľ posledný seizmický roj (2018), roz distribuovaný do troch klastrov. Hypocentrami vyše 4000 javov vyplnil medzeru vzniknutú v roku 2017, a navyše aj posunul minimálnu hĺbku zaznamenaných ohnísk z 6,5 na 6 km. Najvyššie magnitúdo dosiahlo $M_L = 3,8$ (<https://www.ig.cas.cz/vyzkum-a-vyuka/observatore/lokalni-seismicka-sit-webnet/zemetresne-roje-v-zapadnich-cechach-po-roce-2000/> a osobné zdelenie školiteľa).

1.3 Aktivita fluid

V oblasti západných Čiech/Vogtlandu sa nachádza niekoľko oblastí významných kvôli výronom oxidu uhličitého, a to vo forme CO_2 výrazne obohatených výverov minerálnych prameňov a mofiet. Celkový tok plynu dosahuje viac ako $500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, pričom väčšina tejto intenzívnej degazácie prebieha v troch centrách, v ktorých sú emitované plyny tvorené z vyše 99 obj. % oxidom uhličitým (Kämpf et al., 2007). Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ sa pohybujú približne v rozpätí od -2 do -4‰. Výrony sú charakteristické aj vysokými podielmi $^3\text{He}/^4\text{He}$. Hodnoty oboch uvedených parametrov, výrazne vyššie ako v prípade bežnej kontinentálnej kôry, tu teda naznačujú pôvod fluid vo vonkajšom plášti. Namerané hodnoty sa znižujú so vzdialenosťou od týchto centier (Fischer et al., 2014). Na základe datovania travertínových polôh v oblasti Karlových Varov bol začiatok hydrotermálnej aktivity s vysokým obsahom CO_2 stanovený najviac na 0,23 Ma (Vylita et al., 2007), čo zvykne byť spájané s existenciou magmatických rezervoárov pod západnými Čechami a s tým súvisiacim kvartérnym vulkanizmom na tachovskom zlome (Fischer et al., 2014). Táto sopečná činnosť je datovaná do rozmedzia 0,78-0,12 Ma (napr. Mrlina et al., 2007).

2 Ohniskové mechanizmy

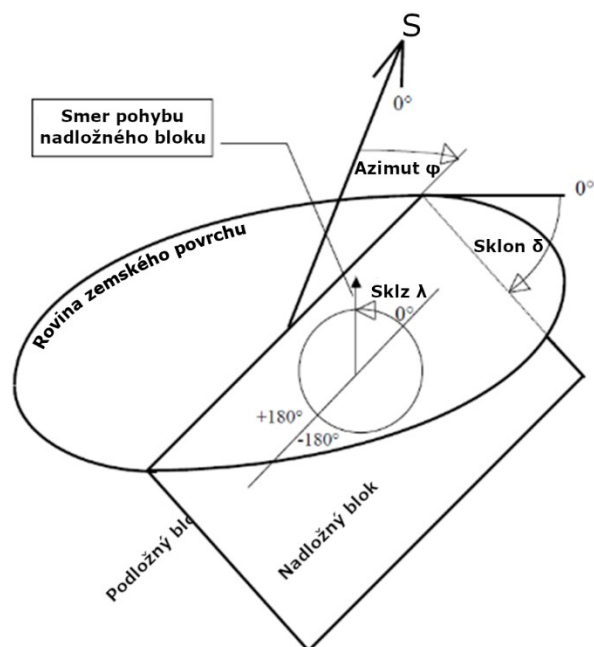
2.1 Parametrizácia zlomovej plochy

Pretože drvivá väčšina zemetrasení prebieha ako následok pohybov na zlome, bol na ich popis vytvorený samostatný aparát, ktorý bude hlavnou náplňou nasledujúcej kapitoly. Geologický zlom možno popísať ako plochu v zemskej kôre, na ktorom dochádza k vzájomným pohybom. Litosférické bloky, ktorých diskontinuity definujú povrch zlomov, sa podľa ich relatívnej pozície vo vertikálnom smere delia na nadložné a podložné. Geometria zlomu sa popisuje orientáciou ϕ , sklonom δ zlomovej plochy (angl. „strike“ a „dip“) a pomocou uhla sklzu λ (angl. „slip angle“ alebo „rake“), (Stein a Wysession, 2003) Ilustrácia týchto troch uhlov je na Obrázku 4.

Orientácia zlomu (ϕ je z $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$), tiež aj azimut, sa určuje ako uhol (ležiaci v rovine zemského povrchu a meraný v smere hodinových ručičiek) medzi nulovým azimutom, teda severom a smerom priebehu zlomu. Priebeh zlomu možno často pozorovať aj na povrchu, ako líniu tvorenú prienikom zlomovej plochy so zemským povrchom. Pri takto definovanom uhle ale dochádza k dvom možným prípadom jeho veľkosti (vzájomne pootočených o 180°). Preto sa naviac vyžaduje podmienka, že v prípade, ak sa pozorovateľ díva v smere priebehu zlomu, tak zlomová plocha má upadať po jeho pravej ruke.

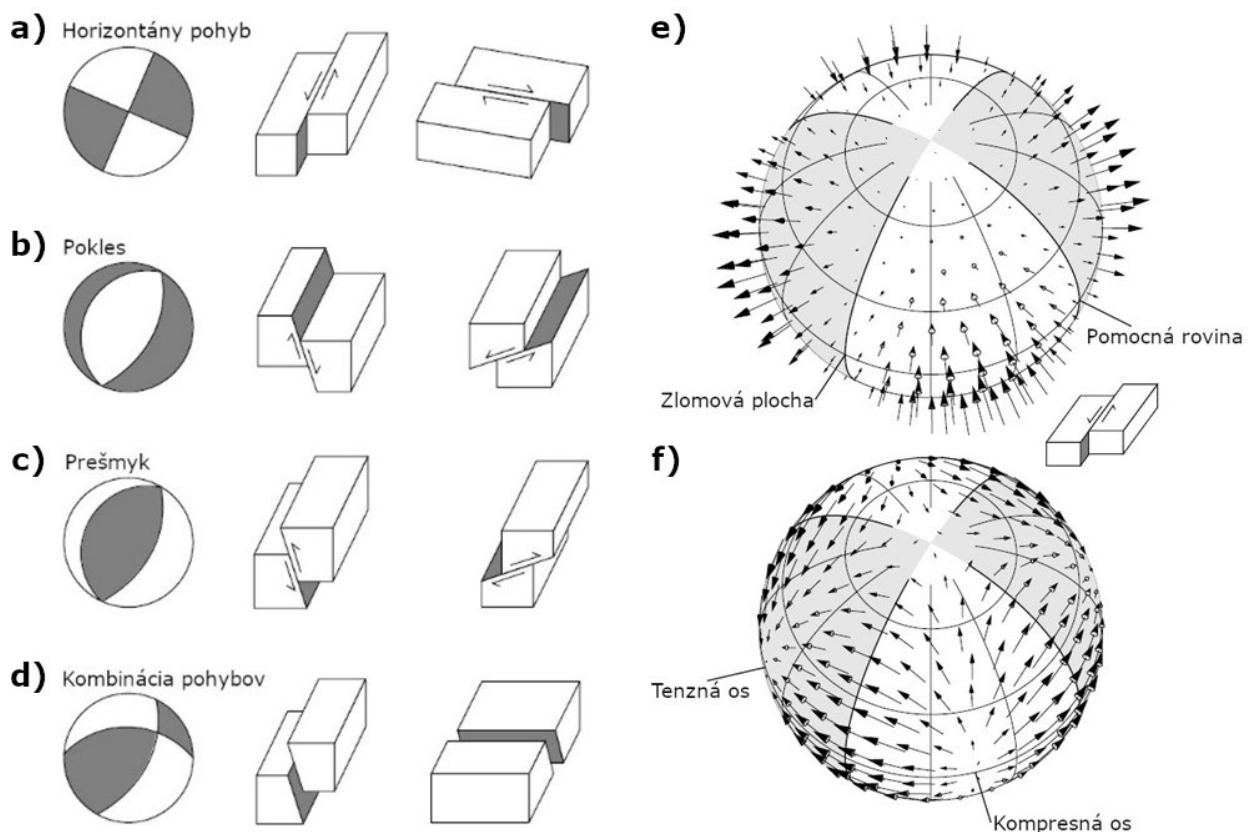
Sklon zlomovej plochy (δ je z $\langle 0^\circ, 90^\circ \rangle$) je definovaný ako uhol zovretý rovinou zemského povrchu a zlomovou plochou. Aj v tomto prípade dôjde k dvojznačnosti určovania uhla, preto je potrebný dôvetok o tom, že jeho veľkosť musí byť menšia ako 90° . Sklon 0° tak predstavuje horizontálny zlom a sklon 90° reprezentuje vertikálnu zlomovú plochu.

Uhol sklzu (λ je z $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$) predstavuje uhol medzi priamkou, určenou smerom priebehu zlomu, a pohybovým vektorom. Meraný je proti smeru hodinových ručičiek. Pohybový vektor popisuje pohyb nadložného bloku voči podložnému. Napríklad, sklz 0° teda predstavuje ľavostranný horizontálny posun.



Obrázok 4: Modelové zobrazenie parametrizácie zlomovej plochy pomocou azimutu, sklonu a sklzu (Bormann a Bergman, 2000, upravené).

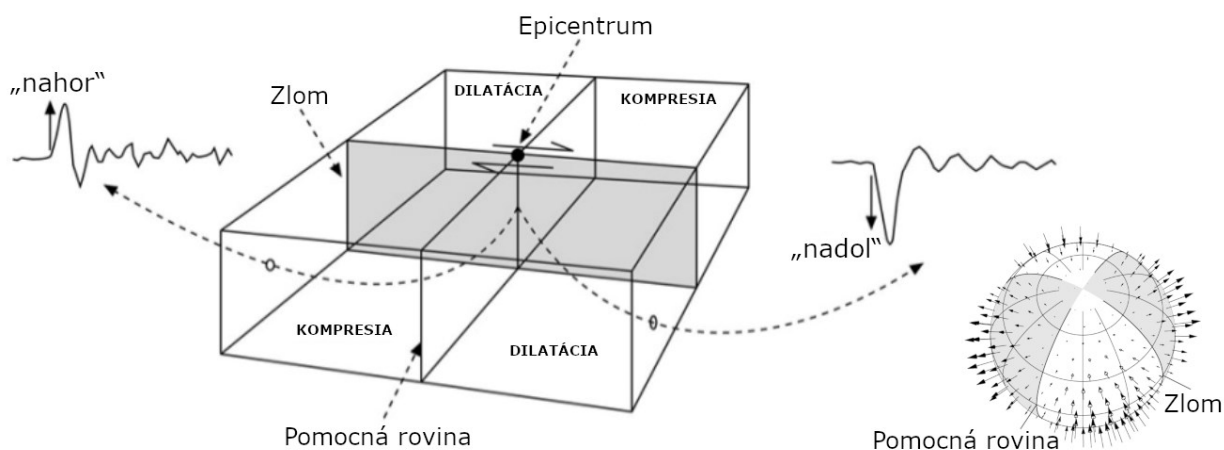
Čo sa týka bližšieho popisu pohybov blokov, rozlišujú sa tri základné typy, a to pokles, prešmyk a horizontálny pohyb (Obrázok 5a-d). Obzvlášť v štruktúrnej geológii sa rozlišuje ešte jeden režim, násun. Ten je popisovaný ako len mierne sklonený, až horizontálny prešmyk. Ten v rámci potrieb pre seizmológiu môžeme nechať stranou a používať preň tiež pojem prešmyk. Pri **poklese** dochádza k zosuvu nadložného bloku voči podložnému, pričom $\lambda = 270^\circ$. V prípade **prešmyku** dochádza k vyzdvihnutiu nadložného bloku voči podložnému, teda k jeho nasúvaniu, a vtedy $\lambda = 90^\circ$. Ak nedochádza k vzájomným vertikálnym pohybom dvoch blokov, ale len k ich horizontálnym posunom po zlomovej ploche, jedná sa o **horizontálny pohyb**. Za týchto okolností je ešte potrebné rozlíšiť, či sa jedná o ľavo- alebo pravostranný posun, kedy $\lambda = 0^\circ$, resp. $\lambda = 180^\circ$. Na povrchu to možno zistiť tak, že ak sa pozorovateľ díva z jednej strany zlomu na druhú, kde vidí objekty posunuté smerom doľava voči ich polohe pred zemetrasením, tak nastal ľavostranný posun. Analogicky to, samozrejme, platí aj pre druhý menovaný prípad. V skutočnosti je ale takmer každá aktivita na zlomoch tvorená kombináciou niektorých z uvedených pohybov, pričom táto klasifikácia platí pre všetky škály. Teda od tzv. „megathrustov“, čiže silných zemetrasení na konvergentných rozhraniach litosférických dosiek (možné $M_L > 9$), až po nanozemetrasenia s $M_L < -2$.



Obrázok 5: Ilustrácie (a) až (d) demonštrujú rôzne typy pohybov blokov na zlome a k nim prislúchajúce stereografické zobrazenia („beachbally“). (a) pre horizontálny pohyb, (b) pokles, (c) prešmyk a (d) je ich kombináciu. Modely (e) a (f) schematicky zobrazujú vyžarovanie P a S vln zo zdroja, v tomto prípade pri horizontálnom pohybe. Orientácia šípok ukazuje smer prvého pohybu, ich dĺžka zobrazuje amplitúdu vyžarovanej vlny. Smery prvých pohybov P-vln v kompresnom sektore (šedou) ukazujú smerom dovnútra, v dilatáčnom dovnútra (Shearer, 2009, upravené).

Parametrizácia pohybov na zlome pomocou trojice zmienených uhlov, je však dostatočná len pre popis jednoznačných posunov. Pre štúdium takýchto pohybov na zlome a zistenie ohniskových mechanizmov sa v seizmológii vychádza zo seizmogramov tohto javu (Stein a Wysession, 2003). V texte nižšie bude najprv venovaná pozornosť najjednoduchšej metóde ich určovania, a to pomocou polarity prvého príchodu P-vĺn. Pri zemetrasení sa z ohniska vyžiaria seizmické P a S vlny, ktorých amplitúda a polarizácia je daná geometriou aktivovaného zlomu. Pre naše účely je vhodné pracovať s P-vlnami, nakoľko ich vyžarovacia charakteristika (závislosť amplitúdy od geometrie zdroja) je pomerne jednoduchá. Tento druh vĺn je pre takéto štúdium vhodný aj z nasledovných dôvodov. Navyše, médium, ktorým P-vlna prechádza, sa jej účinkom pohybuje v smere rovnobežnom s touto vlnou, t. j. je polarizovaná v smere šírenia (Obrázok 5e,f).

Čo sa týka zaznamenananej polarity prvého príchodu P-vlny, rozlišuje sa kladná a záporná, a závisí od polohy seizmografu voči zdroju a pohybu na zdroji (Obrázok 6), t. j. mení sa v rôznych smeroch od hypocentra. Ak stanica zaznamená najprv kladnú polaritu, tak to značí prvotnú kompresiu materiálu v podloží stanice. V prípade zápornej polarity sa jedná o dilatáciu, teda o opačný prípad (Obrázok 6).



Obrázok 6: Schéma zobrazuje vzťah medzi horizontálnym pohybom na zlome, pozíciami oblastí kompresie a dilatácie a polaritou prvého príchodu P-vĺn. Miesta, ku ktorým smeroval prvotný pohyb na zlome, spadajú do kompresných oblastí. V nich seizmogramy zaznamenajú kladnú polaritu prvého príchodu P-vĺn. Pre oblasti dilatácie to platí opačne (Stein a Wysession, 2003 a Shearer, 2009, upravené).

Tieto a ďalšie dáta sa v podobe bodov (podľa azimutu a uhla východu) vynášajú na Schmidtovu plochojavnú sieť (softvérom či ručne). Skupiny bodov s rovnakou polaritou sú následne oddelené dvoma, vzájomne kolmými, tzv. nodálnymi rovinami. Jedna z nich predstavuje plochu zlomu a druhá sa nazýva pomocná rovina, bez ďalších indícií ich však nemožno rozlíšiť. Týmito plochami vymedzené zóny predstavujú oblasti kompresie a dilatácie (podľa polarity v nich ležiacich staníc), označované čiernou, resp. bielou farbou. Výsledný grafický výstup tohto procesu sa nazýva „beachball“ a slúži na prehľadné

zobrazenie ohniskových mechanizmov, teda už spomínaných pohybov na zlome (Obrázok 5a-d). Metódou uvedenou v tomto odseku však možno odhadnúť len čisto strižné pohyby. Teda také, ktoré prebiehajú bez objemových zmien v zlomovej zóne.













Ďalšia forma reprezentácie ohniskových mechanizmov využíva tzv. momentový tenzor. Nielen, že tento tenzor umožňuje popis zložitejšej kinematiky v hypocentre, ale možno ním určiť aj sily, ktoré pôsobia v zlomovej zóne (Stein a Wysession, 2003). Momentový tenzor sa vo všeobecnosti skladá z troch zložiek (Obrázok 7). Ich krátke predstavenie bude náplňou troch nasledujúcich odsekov.

Pri popise vzájomného pohybu dvoch blokov pomocou dvojice opačne orientovaných síl (angl. „force couple“) vzniká točivý moment, ktorý sa však v reálnych zemetraseniach nevyskytuje. Z tohto dôvodu sa tento pohyb vyjadruje **dvojitým dipólom** (angl. „double couple“, skr. DC). Ten sa prejavuje rovnakým účinkom až na ten fakt, že už nespôsobuje točivý moment. Popis zdroja výlučne pomocou dvojitého dipólu je ale možný len v prípade, ak je zemetrasenie spôsobené čisto vzájomným „klzaním“ blokov tvoriacich zlomovú zónu, bez ich vzájomného približovania či oddiaľovania sa. Inak povedané, pohyb tu nastáva v jednej rovine, t. j. v rámci dvoch dimenzií. Stopa, teda súčet prvkov hlavnej diagonály, výlučne dvojdipólového tenzoru je nulová.

Ako už bolo naznačené, momentovým tenzorom sa vyjadrujú aj účinky vyvolané objemovými zmenami v ohnisku, a to pomocou **trojitého dipólu** (angl. „triple dipole“ (Stein a Wysession, 2003), skr. ISO). Vďaka tomu možno vyjadriť priblíženie alebo oddialenie blokov tvoriacich zlomovú zónu, ale aj zaznamenať otrasy spôsobené netektonickou aktivitou v podobe explózie či implózie (napr. podzemný výbuch, resp. banský zával). Uvoľnená energia zapríčiňujúca otras tu vyžaruje všetkými tromi smermi, teda pohyb nastáva v rámci troch dimenzií. Stopa takéhoto momentového tenzoru je nenulová.

A napokon, nedvojdipólovým momentovým tenzorom sa dá popísať aj tzv. **„Compensated Linear Vector Dipole“** (skr. CLVD). Tiež je síce popisovaný tromi dipólmi, avšak od predchádzajúcej zložky sa líši tým, že jeden z troch prvkov jeho stopy je -2 násobkom každého zo zvyšných dvoch. Výsledná objemová zmena je v tomto prípade nulová, obdobne ako v prípade dvojdipólovej zložky. Zemetrasenia s prevažujúcou zložkou CLVD sú ale veľmi zriedkavé, pozorované boli napríklad pri otrasoch spôsobených výstupom magmy.

Dvojitým dipólom teda možno vyjadriť strižnú zložku pohybu a trojitým dipólom objemové zmeny v ohnisku. Pôvod CLVD býva často neznámy a niekedy sa dokonca interpretuje ako relikť matematického výpočtu. Príčina pomeru, ktorým tieto zložky prispievajú k výslednému ohniskovému mechanizmu tohto zemetrasenia, je v oblasti západných Čiech často nejasná (napr. Horálek a Šílený, 2013 a Šílený a Horálek, 2016).

Momentový tenzor	„Beachball“	Momentový tenzor	„Beachball“
$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$-\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$	

Obrázok 7: Prehľad základných typov „beachballov“ a k nim prislúchajúcich momentových tenzorov. Najvrchnejšie dva popisujú čisto objemové zmeny, prostredníctvom trojitého dipólu (ISO). Ide o explóziu (vľavo) a implóziu (vpravo). V ďalších troch riadkoch nasleduje šestica, demonštrujúca strižné pohyby (DC). Smerom nadol tak postupne vidieť ukážky horizontálnych pohybov, vertikálnych pohybov a napokon prešmykov. Štvorica v najspodnejšej časti vystihuje prejavy CLVD (Stein a Wysession, 2003, upravené).

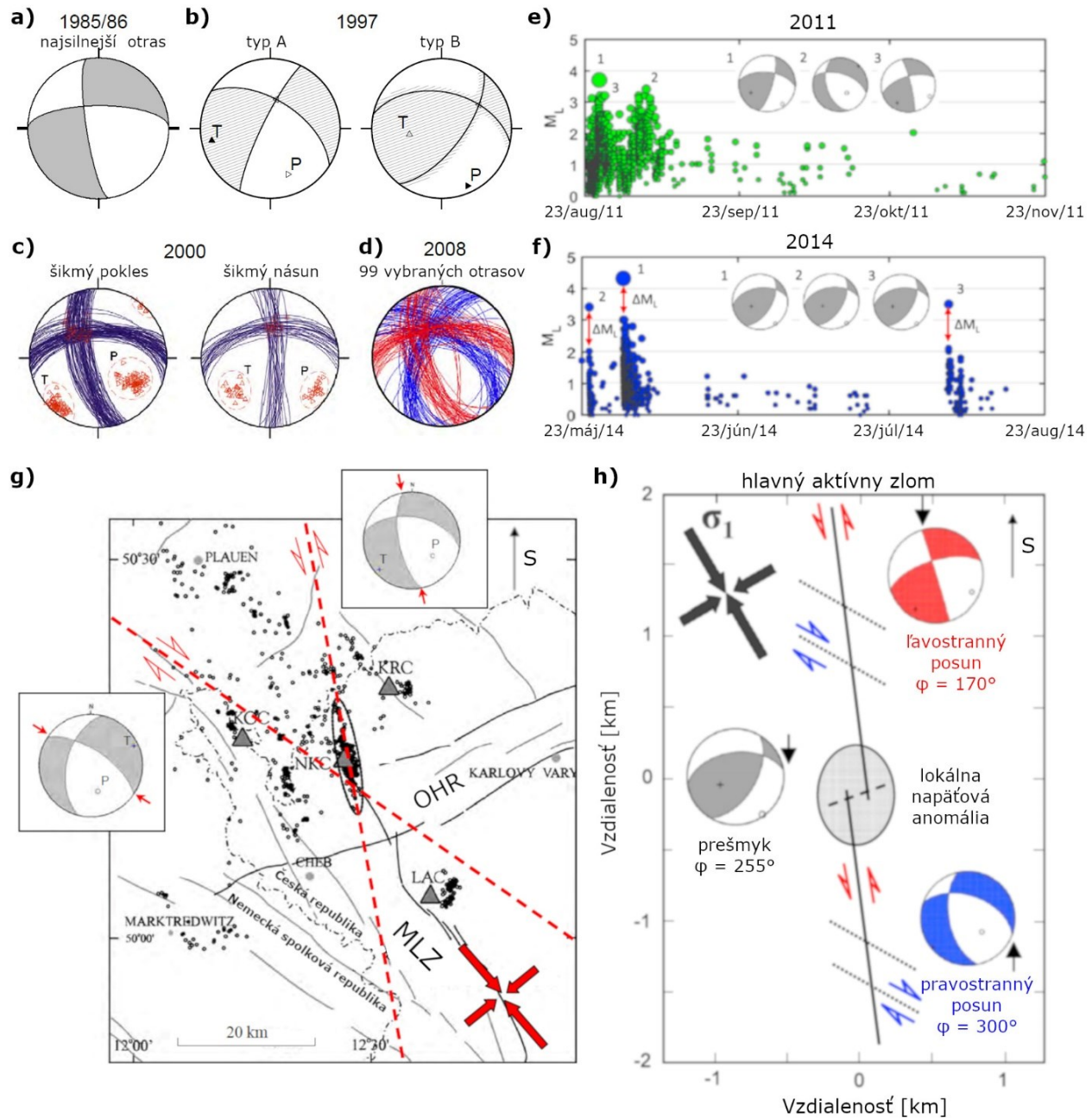
2.2 Mechanizmy Novokosteleckej zlomovej zóny

Prvé spoľahlivé ohniskové mechanizmy z lokality Nový Kostel boli určené na základe dát získaných počas roja 1985/86 (napr. Špičák, 1987). K dispozícii sú aj mechanizmy z rojov 1997 (Dahm et al., 2000) a 2000 (napr. Fischer a Horálek, 2005). Pozornosť v tejto práci však bude venovaná hlavne postmileniálnym rojom, pri ktorých štúdiu už bolo možné vychádzať z väčšieho počtu dát, čo súvisí najmä s rozširovaním lokálnej seizmickej siete WEBNET.

Počas každého roja, s výnimkou rokov 1997 a 2014, dominovali ohniskové mechanizmy indikujúce prevažne horizontálne pohyby, a to na zlomovej ploche s azimutom približne $\phi = 170^\circ$ (Obrázok 8a-f). Vavryčuk a Adamová (2018) k tomu dopĺňajú, že táto hlavná zlomová zóna pozostáva zo severného a južného segmentu a upadá pod uhlom asi $\delta = 65^\circ$, pričom v hĺbke 8 km sa sklon zväčšuje až na $\delta = 80^\circ$. Spomenuté dve časti sú od seba odsadené asi o 200 m, pričom ich vzájomné prekrývanie je z hľadiska ich dĺžky minimálne (Obrázok 8h). Čo sa týka vedľajších zlomových pohybov, tak tie sú zastúpené hlavne aktivitou na plochách s orientáciami zhruba $\phi = 300^\circ$, rozdistibuovanou pozdĺž hlavnej zlomovej zóny (Obrázok 8d,e,g,h). Pohybmi na takýchto plochách sa vyznačoval najmä roj 2008 (Vavryčuk a Adamová, 2018).

Neobvyklý roj 2014 sa vyznačoval svojimi tromi najsilnejšími zemetraseniami ($M_L = 3,5$ až $M_L = 4.4$) práve v oblasti spomínaného prekrývania sa dielčích segmentov, pričom neboli súčasťou typického seizmického roja. Jednalo sa skôr o hlavné otrasy, nasledované sériou dotrasov. Smery nodálnych rovín, teda potenciálnej zlomovej plochy spomenutých zemetrasení, sa podľa Jakoubkovej et al. (2018) pohybujú od 25° do 43° , resp. od 254° do 270° , pričom za pravdepodobnejšiu z nich títo autori považujú prvú

možnosť. Avšak Vavryčuk a Adamová (2018) sa prikláňajú k druhej menovanej nodálnej rovine. Z ohniskových mechanizmov vyplýva (Obrázok 8f), že pohyby zapríčinené týmito tromi javmi, neobvyklé pre lokalitu Nového Kostela, mali charakter prešmyku s významným podielom horizontálneho posunu. Pričom príčinou bola zrejme akumulácia kompresného napätia a jeho rýchle uvoľnenie, zakaždým nasledované sériou dotrasov (Hainzl et al., 2016 a Vavryčuk a Adamová, 2018).



Obrázok 8: Určené ohniskové mechanizmy v Novokosteleckej zdrojovej oblasti medzi rokmi 1986 až 2014 (a-f). Mapa (g) zobrazuje hlavné smery regionálneho napätia a k nemu optimálne orientovaných zlomov. Podrobný pohľad na zónu aktivovanú v roku 2014 je na obrázku (h), kde je možné asociovať určené mechanizmy s priebehmi zlomov (Fischer et al., 2014: (a-d) a (g), Vavryčuk a Adamová, 2018: (e-f) a (h), upravené).

3 Signál a základy jeho spracovania

3.1 Seizmický signál

Pohyby v zemskej kôre sú vďaka šíriacim sa seizmickým vlnám registrované seizmografmi, ktoré tieto vzruchy zaznamenávajú v podobe seizmogramov (seizmických záznamov). Seizmogram teda poskytuje dáta, predstavujúce históriu otrasov v podloží stanice, ktoré sú potom predmetom ďalšieho štúdia. Tieto pohyby sú zvyčajne reprezentované časovou radou vyjadrujúcou zmeny polohy, rýchlosti alebo zrýchlenia. Na seizmickom zázname sa ale môžu prejavovať aj iné vplyvy než tie, ktoré sú spojené s pohybmi na zlomoch, prípadne ďalšími činiteľmi spomenutými v predchádzajúcich kapitolách. A to napríklad antropogénna aktivita alebo slapové javy.

Dáta zo seizmogramu možno rozdeliť do dvoch skupín, a to na signál a šum. Za signál sa vo všeobecnosti považuje tá časť dát, ktorú je možné spracovať tak, aby z nej boli získané zrozumiteľné informácie, vhodné na ďalšiu interpretáciu. Ide teda o „užitočnú“ časť dát. Naproti tomu pod pojmom šum sa rozumie tá zložka seizmického záznamu, z ktorej nemožno vyťažiť relevantné informácie. Vplyvom nových poznatkov vedúcich k lepšiemu porozumeniu seizmickým dátam, sa však aj zo zložky pôvodne považovanej za šum môže stať užitočný signál.

Seizmický záznam môže byť registrovaný a uchovávaný buď ako spojitý (analogový) alebo nespojitý (digitálny). V súvislosti s analogovým si možno predstaviť seizmogram, ktorý vznikol priamym prenosom z tuhy na papier počas otrasu. Digitálny záznam pozostáva z diskretných dát, ktoré boli zaznamenané s určitou vzorkovacou frekvenciou. Tu je potrebné zmieniť, že pri diskretnom vzorkovaní musí byť vzorkovacia frekvencia viac ako dvojnásobná oproti frekvenciám pôvodného, analogového záznamu. V princípe rovnako, ale po formálnej stránke trochu iným spôsobom, to možno vyjadriť pomocou tzv. Nyquistovej frekvencie: $f_N = \frac{1}{2\Delta t}$, kde Δt predstavuje dĺžku vzorkovacieho intervalu. Pri takejto definícii musí byť f_N vyššia, ako frekvencie pôvodného záznamu. V opačnom prípade dôjde k javu nazývanému „aliasing“, teda k prekryvaniu frekvenčných spektier, čo spôsobí stratu informácií obsiahnutých v analogových dátach pri ich konverzii na digitálne. Naopak, čím vyššia vzorkovacia frekvencia, tým sú vzorkovacie body od seba menej vzdialené a výsledné spektrum (t. j. intenzita signálu v závislosti od frekvencie) je podobnejšie tomu pôvodnému. Z dôvodu predchádzania neželanému „aliasingu“ sa dáta ešte pred digitalizáciou filtrujú tzv. „anti-aliasovým“ analogovým filtrom, ktorý eliminuje frekvencie vyššie ako f_N . Výhodou digitálnych dát je to, že môžu byť počítačovo spracovávané. Na spracovanie takýchto dát, či už za účelom odlíšenia a vyfiltrovaného šumu alebo dekompozície signálu, sa používa celý rad metód. Ich podrobný popis by značne prekročoval požadovaný a plánovaný rozsah tejto práce, a tak v nasledujúcej podkapitole bude pozornosť zameraná len na stručné predstavenie Fourierovej analýzy. Tá je hlavným nástrojom využívaným pri spracovaní akéhokoľvek signálu.

3.2 Fourierova analýza

Pomocou Fourierovej analýzy možno každý časový rad vyjadriť ako súčet alebo integrál harmonických funkcií o rozdielnych frekvenciách. Z týchto funkcií možno následne odstrániť tie s neželanými frekvenciami a zbytok spätne transformovať do jedinej funkcie. Takýto rozklad konečného časového radu na súčet dielčích funkcií sa vykonáva pomocou Fourierovho radu, zatiaľ čo na rozklad spojitého časového radu slúži Fourierova transformácia (Stein a Wyssession, 2003).

Fourierov rad

V prípade, že pre funkciu $f(t)$ existujú nasledujúce integrály:

$$\begin{aligned}a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt, \\a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos \frac{2\pi n t}{T} f(t) dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \\b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin \frac{2\pi n t}{T} f(t) dt, \quad n = 1, 2, \dots,\end{aligned}$$

tak potom k nej za splnenia dodatočných podmienok (viď nižšie) existuje Fourierov rad pre interval $\langle -\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \rangle$ (podľa Stein a Wyssession, 2003):

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right).$$

Na doplnenie tejto stručnej definície je potrebné poznamenať nasledovné. Fourierov rad nemusí nutne konvergovať a obe strany vyššie uvedeného výrazu si nemusia byť rovné. Avšak v seizmologickej praxi, vzhľadom na povahu seizmického signálu, by tieto dve eventuality nemali predstavovať problém hodný ďalších diskusií.

Ak sa pracuje s uhlovou frekvenciou, tak vo výrazoch z predchádzajúcej definície sa zavádza substitúcia:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Fourierov rad je ale možné zapísať aj jednoduchšie, a to v komplexnom tvare:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{i\omega_n t},$$

pričom členy F_n sú vyjadrené takto:

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{-i\omega_n t} f(t) dt.$$

Fourierova transformácia

Zatiaľ čo Fourierov rad je využívaný na analýzu diskretných dát, v seizmológii sa možno častejšie stretnúť s Fourierovou transformáciou, ktorá sa odvádza z Fourierovho radu. Na výskum zemetrasení je využívaná kvôli tomu, že pomocou nej možno analyzovať obor spojitých uhlových frekvencií, teda takých, za aké sú považované aj seizmické vlny (Stein a Wysession, 2003).

Vychádzajúc teda z komplexného tvaru Fourierovho radu, resp. členov F_n , je možné odvodiť nasledovné vzťahy:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega,$$

resp.

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Pri prvom uvedenom vzťahu sa jedná o tzv. spätnú Fourierovu transformáciu, zatiaľ čo druhý menovaný predstavuje „vlastnú“ Fourierovu transformáciu.

Naviac, Fourierova transformácia sa dá vyjadriť aj v tejto podobe:

$$F(\omega) = |F(\omega)| e^{i\phi(\omega)},$$

ktorá obsahuje amplitúdové spektrum $|F(\omega)|$, resp. fázové spektrum $\phi(\omega)$:

$$|F(\omega)| = \left[\operatorname{Re}^2(F(\omega)) + \operatorname{Im}^2(F(\omega)) \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ resp. } \phi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}(F(\omega))}{\operatorname{Re}(F(\omega))} \right).$$

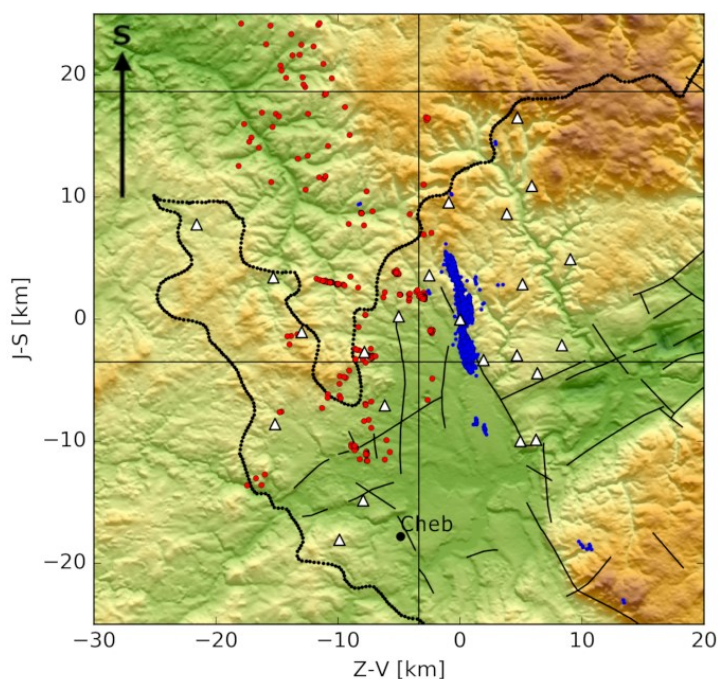
Oba výrazy sú funkciou uhlovej frekvencie, pričom závislou premennou pri $|F(\omega)|$ je amplitúda a pri $\phi(\omega)$ je ňou fáza.

4 Dáta

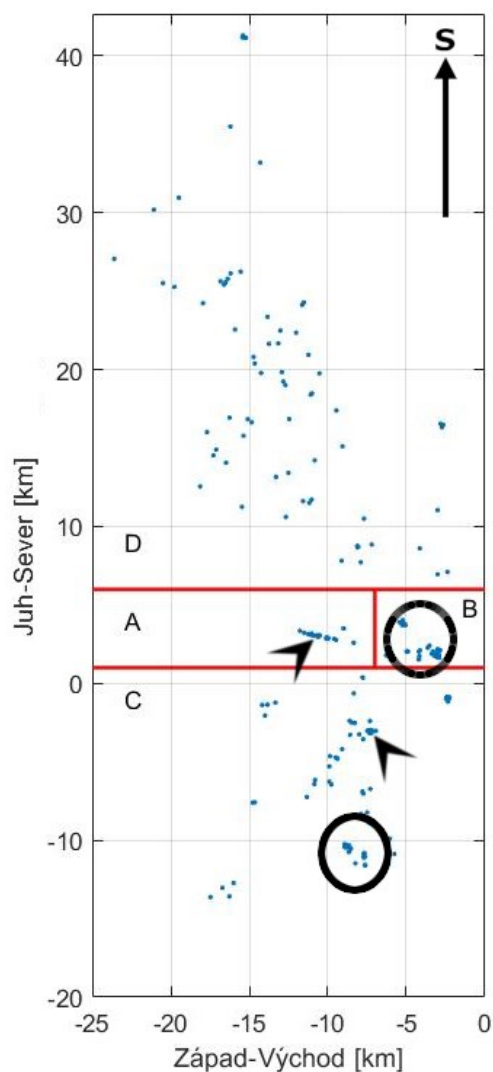
Táto kapitola je zameraná na predstavenie dát, v spracovávanom seizmickom katalógu, obsahujúcom záznamy siete WEBNET o zemetraseniach lokalizovaných západne od Novokosteleckej zóny (Obrázky 9-11). Ten pokrýva obdobie rokov 2005 až 2016 (Obrázok 12). Dáta boli za účelom zjednodušenia orientácie v nich a práce s nimi rozdelené do štyroch podskupín. A to na základe priestorového rozmiestnenia ohnisk jednotlivých javov. Výsledkom je rozčlenenie do štyroch podoblastí, označených písmenami A až D (Obrázok 10). Pretože každá podoblasť je v niečom špecifická, kritéria na výber zemetrasení, ktorých ohniskové mechanizmy boli vo výsledku určované, neboli jednotné (jednalo sa o kombinácie minimálneho magnitúda a minimálneho počtu P-fáz jedného javu, ale aj o polohu hypocentra voči seizmickej sieti a iné). Vždy však bol braný zreteľ na to, aby pri vybraných zemetraseniach bolo určovanie mechanizmov čo možno najpresnejšie.

V nasledujúcich podkapitolách budú bližšie rozobraté zaujímavejšie lokality vyčlenených podoblastí. Tieto lokality by mali byť schopné čo-to vypovedať o geologickom stave skúmanej oblasti už aj samy o sebe, teda bez ďalšieho štúdia.

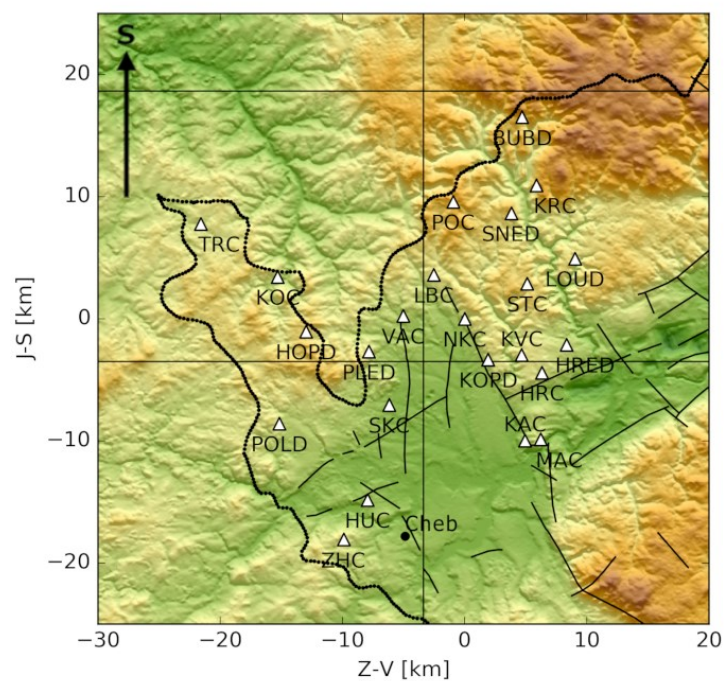
Pre lepšie zoznámenie sa s touto kapitolou sa odporúča nahliadnuť do vizualizácií v Prílohe 1.



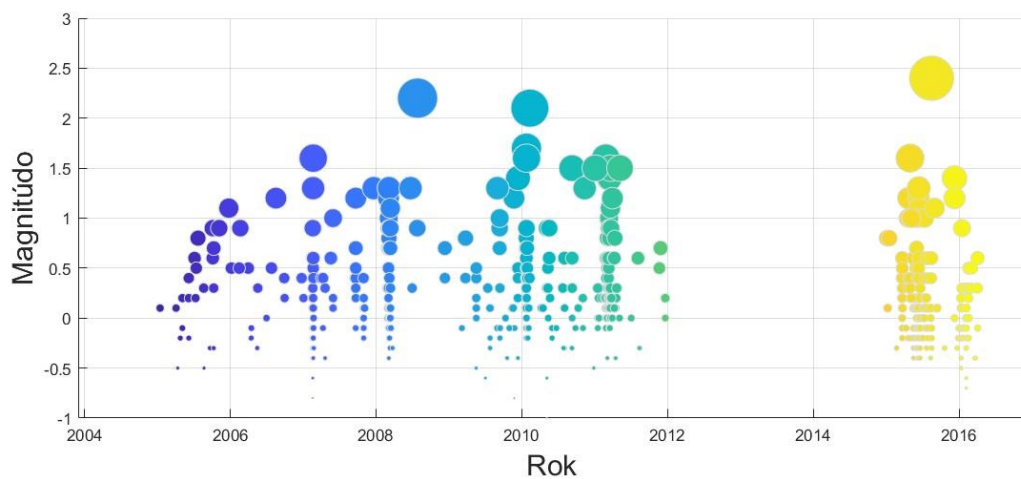
Obrázok 9: Mapa záujmovej oblasti. Modré bodky predstavujú zemetrasenia v Novokosteleckej zdrojovej oblasti. Červené bodky sú hypocentra z vedľajších zdrojových oblastí, spracovávaných v tejto práci.



Obrázok 10: Rozčlenenie študovanej seizmicity do podoblastí A-D, analyzovaných samostatne.



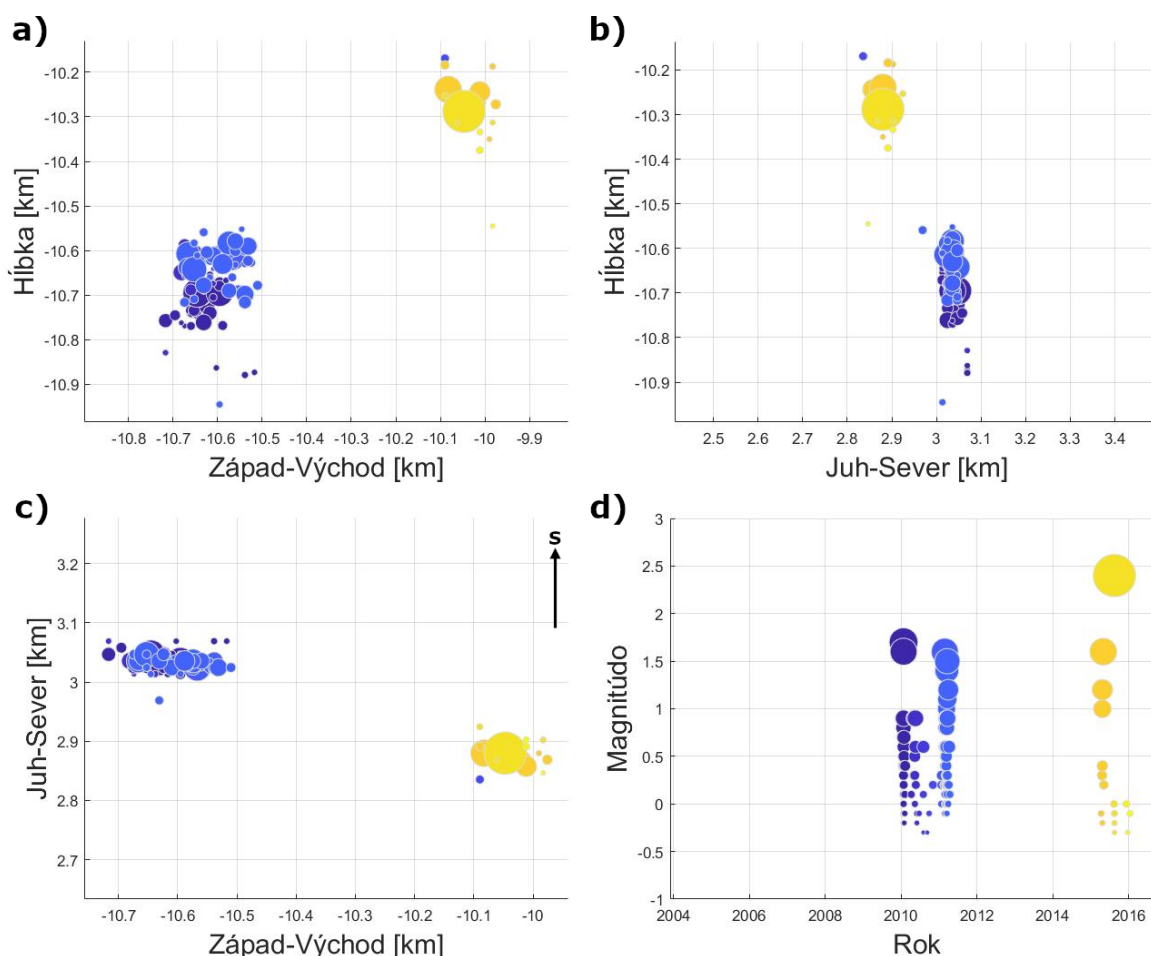
Obrázok 11: Rozloženie staníc siete WEBNET (biele trojuholníky) v oblasti západných Čiech.



Obrázok 12: Časový vývoj seizmicity spolu s magnitúdami v záujmovej oblasti. Farba zodpovedá času vzniku, veľkosť magnitúdu zemetrasenia. Zobrazené a študované sú len obdobia s výraznou zaznamenanou aktivitou.

4.1 Podoblasť A (stred)

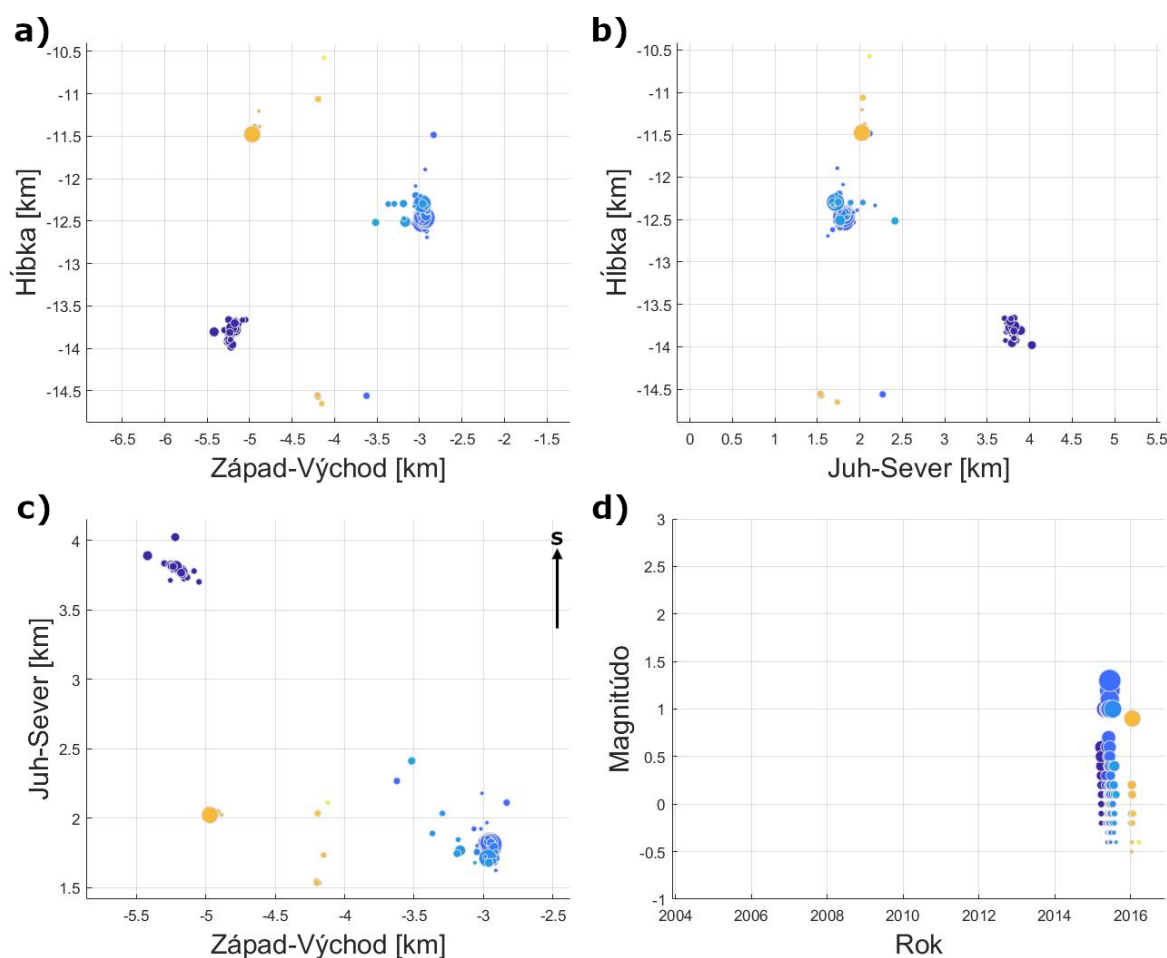
Tvorená je predovšetkým dvoma susediacimi klastrami (Obrázok 13), ktoré sú zároveň ťažiskom záujmu v rámci seizmických dát, poskytnutých k tejto práci. Celkový počet javov v podoblasti je 133. Klastre sú od seba vzdialené ani nie kilometer, hĺbka ohnísk sa pohybuje v rozmedzí 10-11 km. Hlbší z týchto dvoch klastrov celkom jasne mapuje priebeh predpokladanej vertikálnej zlomovej plochy s Z-V orientáciou (Obrázok 13a-c). Seizmická aktivita prebehla v troch fázach (Obrázok 13d), počínajúc začiatkom roka 2010, kedy sa aktivovala najspodnejšia časť zlomovej plochy. Ďalšia skupina zemetrasení nasledovala v roku 2011. Vtedy došlo k pohybom, ktoré nadviazali na aktivitu z prechádzajúceho roka a svojimi hypocentrami zmapovali o niečo severnejšiu časť zlomu. V roku 2015 nastali ďalšie otrasy, ktoré vytvorili plytší zo spomenutých dvoch klastrov. Vtedy nastal najsilnejší zaznamenaný event, s $M_L = 2.4$. Jedná sa zároveň o zemetrasenie s vôbec najsilnejším magnitúdom zo všetkých podoblastí.



Obrázok 13: Prehľad seizmickej aktivity v hlavnom klastri zóny A. (a) predstavuje pohľad z juhu na hĺbkový rez vedený v Z-V smere. (b) predstavuje pohľad z východu na hĺbkový rez vedený v smere J-S. (c) poskytuje mapový pohľad. (d) ukazuje časový vývoj seizmicity. Veľkosť krúžku indikuje magnitúdo zemetrasenia, farba čas jeho vzniku.

4.2 Podoblast B (východ)

Vyznačuje sa prítomnosťou dvoch výraznejších klastrov, vzdialených 3-4 km od seba (Obrázok 14a-c). Ich dlhší rozmer má približne len 200 m. Ohniská väčšiny javov sa nachádzajú v hĺbkach 12-14 km, v hĺbke 11,5 km sa vyskytuje ešte jeden mini-klaster. Najsilnejší otras dosiahol $M_L = 1,3$ a drvivá väčšina zemetrasení nastala v roku 2015. Celkovým počet javov v podoblasti dosahuje 130. Hypocentrá síce zabierajú malý priestor, avšak po detailnejšom posúdení 3D vizualizácie sa možno prikloniť k názoru, že jeden z klastrov (fialovou v obrázku) by mohol indikovať pohyby na vertikálnej zlomovej ploche so smerom JV-SZ.



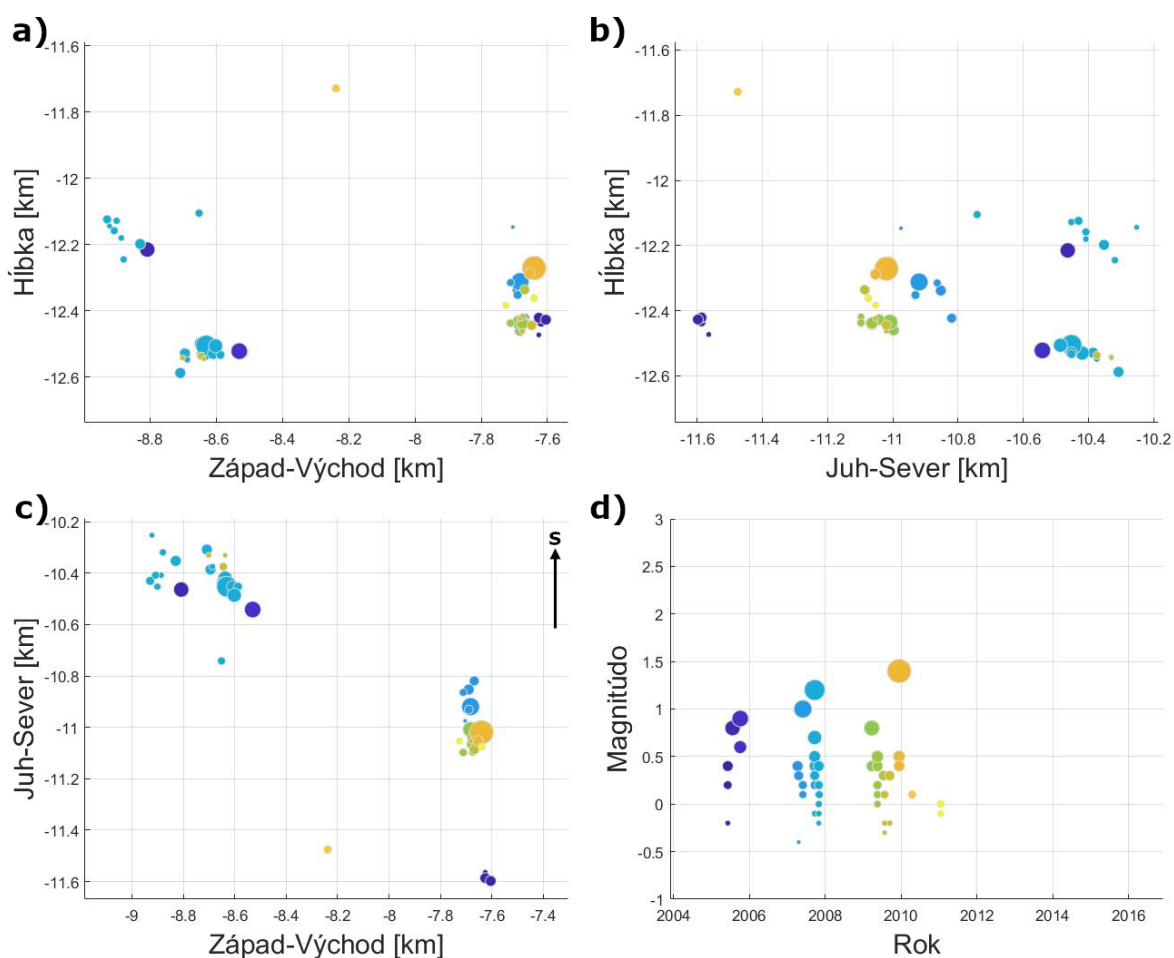
Obrázok 14: Prehľad seizmickej aktivity v hlavnom klastri zóny B. (a) predstavuje pohľad z juhu na hĺbkový rez vedený v Z-V smere. (b) predstavuje pohľad z východu na hĺbkový rez vedený v smere J-S. (c) poskytuje mapový pohľad. (d) ukazuje časový vývoj seizmicity. Veľkosť krúžku indikuje magnitúdu zemetrasenia, farba čas jeho vzniku.

4.3 Podoblast' C (juh)

V tejto zóne sa ohniská pohybujú v hĺbkovom rozpätí od 11 až do 14 km. Najsilnejší otras dosiahol $M_L = 1.6$, dáta tu obsahujú 199 javov. Bližšia pozornosť bude venovaná tým dvom lokalitám, kde došlo k značnejšiemu zoskupovaniu zemetrasení.

Podoblast' C (južné klastre)

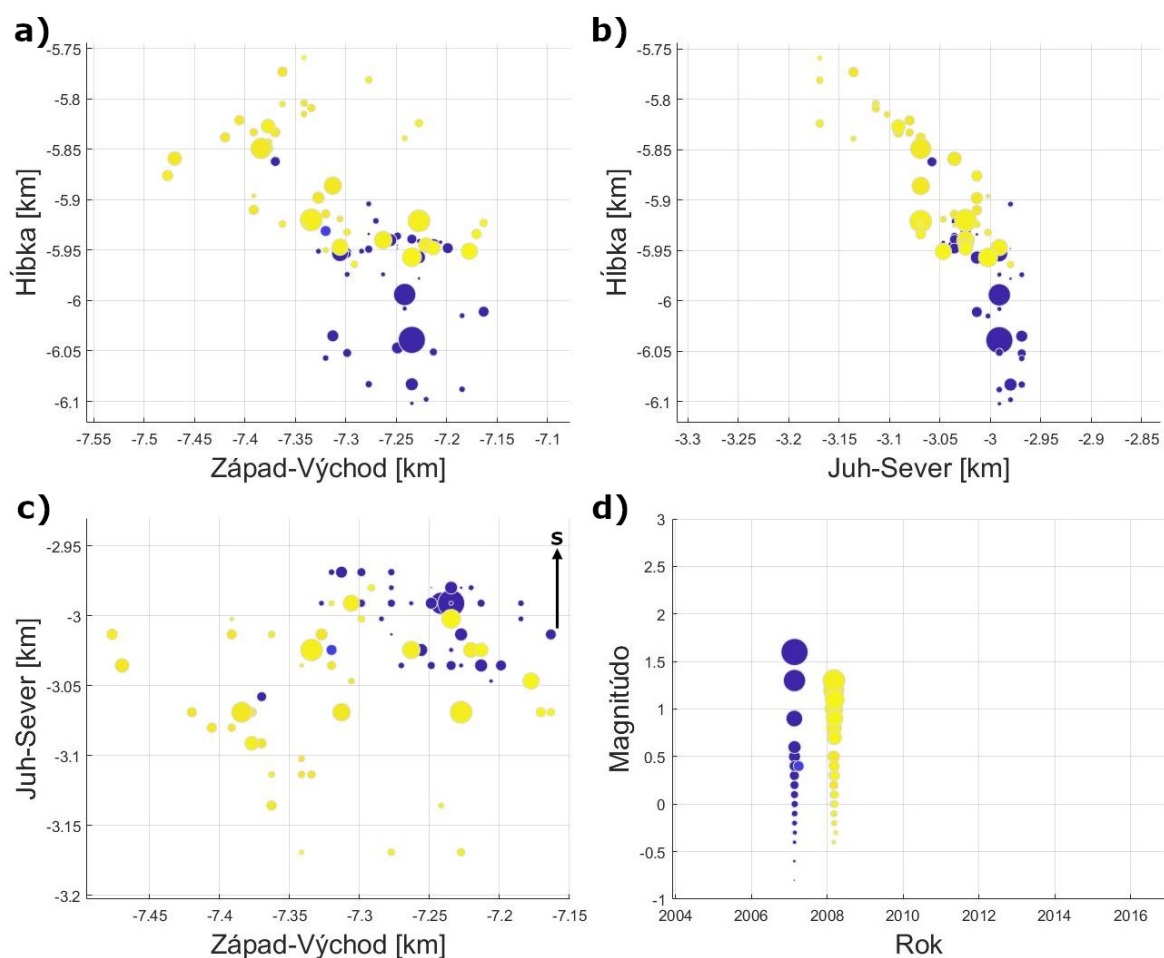
Táto podoblast' zahŕňa dva menšie klastre, s hypocentrami v hĺbkach 12,1 až 12,6 km (Obrázok 15). Aktivita v tomto priestore nie je hojná, no zemetrasenia nastávali viac-menej periodicky. A to v troch, niekoľko mesiacov trvajúcich fázach, so zhruba dvojročnými odstupmi (2005-2009). Západnejším klastrom by zrejme bolo možné preložiť rovinu, indikujúcu zlomovú plochu s orientáciou SZ smeru (Obrázok 15c). Východnejšiemu klastru z tejto dvojice zrejme nemožno pripísať ani čo i len približnú orientáciu.



Obrázok 15: Prehľad seizmickej aktivity v južných klastroch zóny C. (a) predstavuje pohľad z juhu na hĺbkový rez vedený v Z-V smere. (b) predstavuje pohľad z východu na hĺbkový rez vedený v smere J-S. (c) poskytuje mapový pohľad. (d) ukazuje časový vývoj seizmicity. Veľkosť krúžku indikuje magnitúdo zemetrasenia, farba čas jeho vzniku.

Podoblast' C (severný klaster)

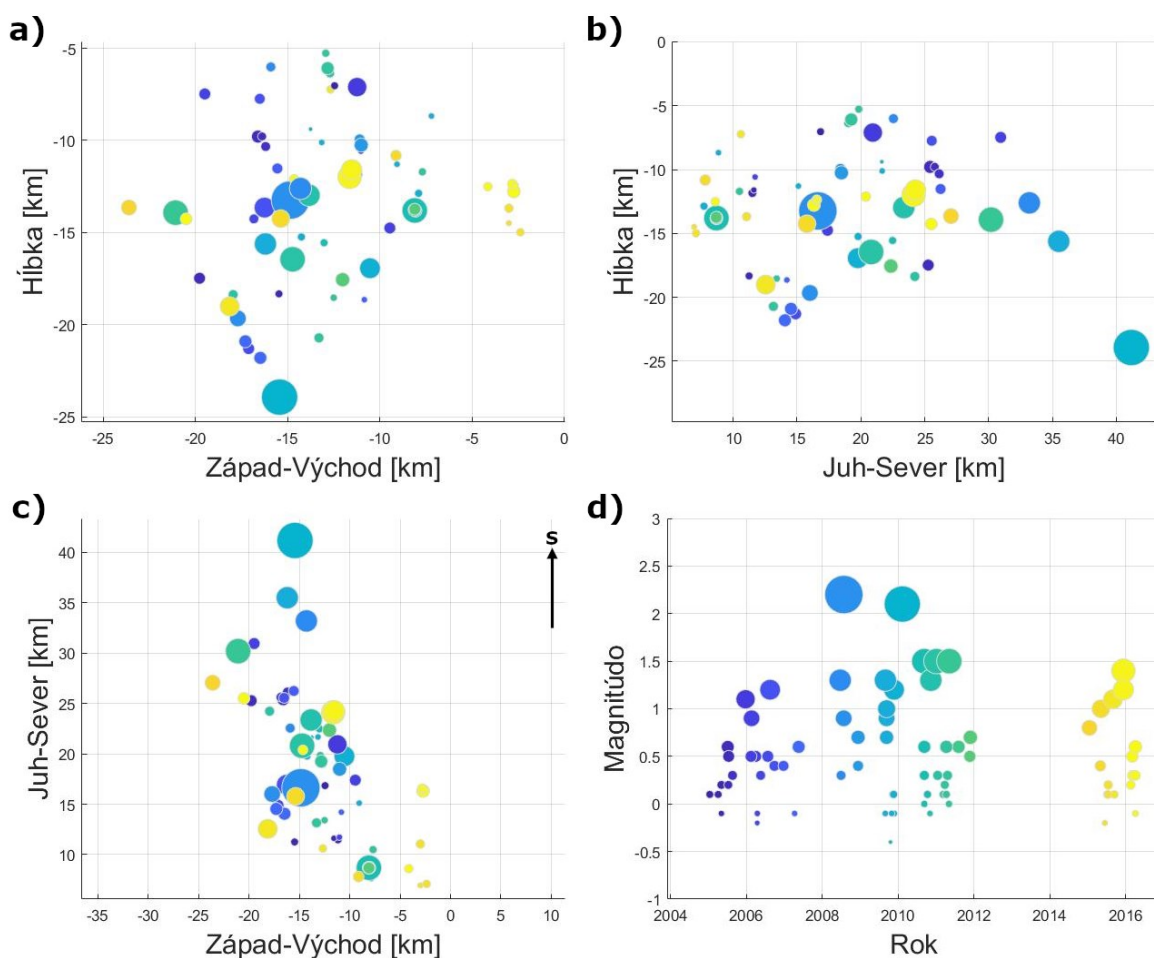
Tvar tohto klastra jasne vystihuje tvar „zahnutej“ zlomovej plochy, aktivovanej v dvoch fázach (Obrázok 16). Jej rozmery sú približne 300 x 300 m. Prvá séria otrasov nastala v roku 2007, kedy sa aktivovala hlbšia, subvertikálna časť zóny. Vtedy došlo aj k spomenutému zemetraseniu s $M_L = 1.6$. Ďalšie otrasy, nasledujúce s asi ročným odstupom, zatrasli s jej plytšou časťou so sklonom zhruba 45° . Približná orientácia predpokladanej zlomovej plochy je v smere JV-SZ, pričom na základe smeru sklonu jej možno priradiť SZ azimut. Hĺbka hypocentier sa pohybuje na hranici 6 km.



Obrázok 16: Prehľad seizmickej aktivity v severnom klasteri zóny C. (a) predstavuje pohľad z juhu na hĺbkový rez vedený v Z-V smere. (b) predstavuje pohľad z východu na hĺbkový rez vedený v smere J-S. (c) poskytuje mapový pohľad. (d) ukazuje časový vývoj seizmicity. Veľkosť krúžku indikuje magnitúdo zemetrasenia, farba čas jeho vzniku.

4.4 Podoblasť D (sever)

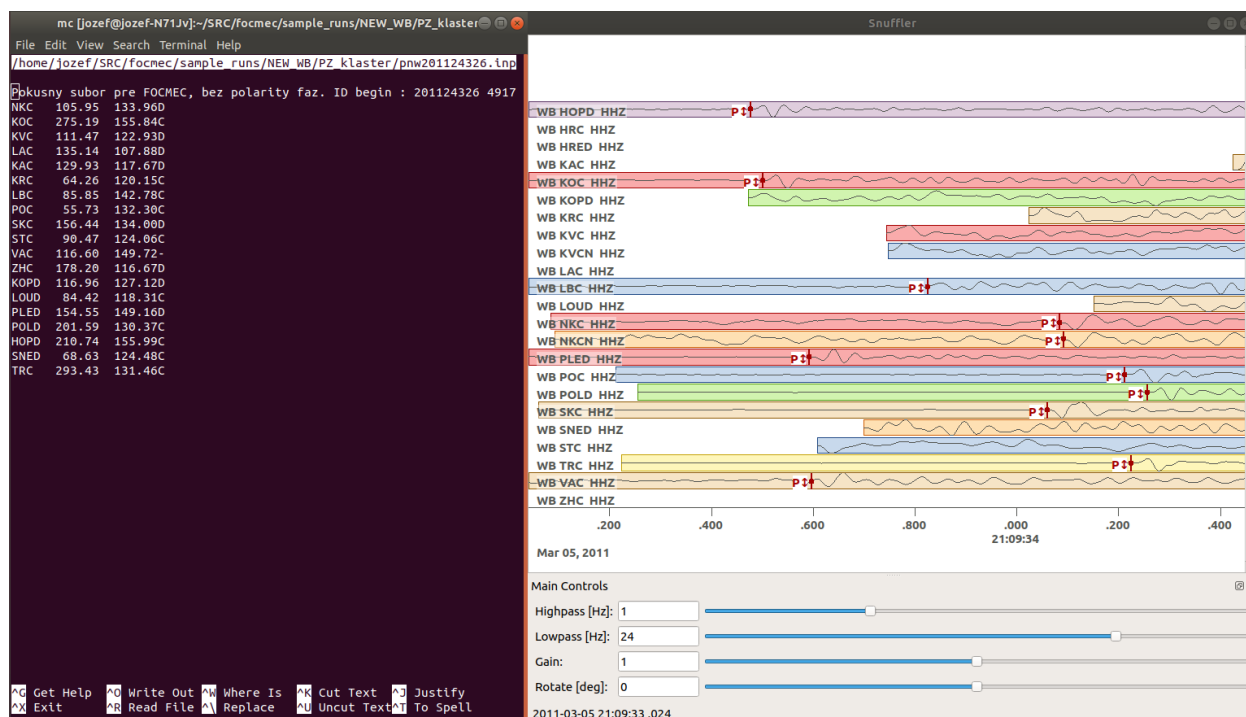
V celej tejto zóne nebol nájdený významný zhluk hypocentier, ktorý by ukazoval na konkrétnu zlomovú plochu tak, ako tomu bolo v predchádzajúcich prípadoch. Podoblasť teda bude predstavená ako celok. Ohniská sa tu rozprestierajú difúzne, bez nejakej zjavnej priestorovej či časovej korelácie (Obrázok 17). V širšom ponímaní však možno vypozerovať trend ich výskytu v smere JV-SZ. Hustota zemetrasení je v tejto podoblasti v porovnaní s ostatnými nižšia, jedná sa totiž o veľký priestor a zaznamenaných je len 79 eventov. Seizmická aktivita sa ale napriek tomu rozprestiera naprieč rokmi 2005 až 2016, podobne ako je to v južnejších oblastiach. Hĺbka ohnisk sa pohybuje od 5 do 24 kilometrov. Čo sa týka zemetrasení s najvyšším magnitúdom, tak tu vyčnievajú dve. Najsilnejšie, s $M_L = 2.2$ nastalo v južnejšej časti podoblasti. Druhé v poradí s $M_L = 2.1$ malo hypocentrum pri severnom okraji zóny a došlo k nemu v hĺbke až 24 km, jej určenie tu ale nemusí zodpovedať realite.



Obrázok 17: Prehľad seizmickej aktivity v celej zóne D. (a) predstavuje pohľad z juhu na hĺbkový rez vedený v Z-V smere. (b) predstavuje pohľad z východu na hĺbkový rez vedený v smere J-S. (c) poskytuje mapový pohľad. (d) ukazuje časový vývoj seizmicity. Veľkosť krúžku indikuje magnitúdo zemetrasenia, farba čas jeho vzniku.

5 Spracovanie

Praktická časť práce spočívala v určovaní a vyhodnocovaní ohniskových mechanizmov mimo Novokosteleckej oblasti. Tie sa skladajú z katalógu vybraných seizmických javov, ktorých relatívna lokácia bola prevedená školiteľom (program HypoDD (Waldhauser a Ellsworth, 2000)). K otrasom v katalógu prislúchajú aj seizmické záznamy v podobe časových radov, popisujúcich rýchlosť pohybu podlažia v metroch za sekundu (seizmogramy vo formáte .mseed). Pri takom spôsobe určovania ohniskových mechanizmov, aký bol použitý v tejto práci, sa zväčša zvyknú používať dáta vyjadrujúce veľkosť posunutia. To by sa skutočne dalo doceliť integráciou časového radu, ale vychádzalo sa zo skutočnosti, že polarita v čase prvého nasadenia seizmickej vlny si zachováva svoj kladný či záporný charakter bez ohľadu na to či sa berie do úvahy časový rad veľkosti posunutia alebo rýchlosti. K týmto seizmogramom je ešte potrebné doplniť, že boli využívané len zložky zaznamenávajúce pohyb seizmogramov vo vertikálnom smere, ktoré sú v tomto prípade najvhodnejšie vzhľadom na fyzikálne vlastnosti šírenia P-vln. Dáta v katalógu sú vždy pod hlavičkou daného javu, nesúcej základné informácie o ňom, nasledované údajmi o dátach zachytených tou-ktorou seizmickou stanicou (vzor katalógu je v Prílohe 2). Pre ďalšiu prácu s katalógom bol v programovacom prostredí MATLAB na základe aktuálnych potrieb priebežne písaný kód na filtráciu poskytnutých zemetrasení a spracovanie výsledku (Príloha 2). Javy vyhovujúce zadanej polohe epicentra, minimálnemu magnitúdu a minimálnemu počtu P-fáz zapisuje do nového súboru vo formáte čitateľnom programom Snuffler (Heimann et al., 2017), ktorý bol použitý na manuálne určovanie polarít fáz. Jedným z údajov nesených týmto vstupným súborom je aj čas príchodu seizmickej vlny k stanici, čo predstavuje súčet času vzniku zemetrasenia a tzv. „travel time“ (doby, ktorá uplynie od momentu vzniku zemetrasenia do prvého príchodu danej vlny k stanici). Kód taktiež môže predpripraviť vstupný súbor pre softvér FOCMEC (Snoke, 2002), ktorý bol v tejto práci využitý na určovanie ohniskových mechanizmov. Po výbere predpokladaných najvhodnejších otrasov boli k nim náležiacie dáta (spomenuté súbory pre Snuffler a vertikálne zložky k nim prislúchajúcich seizmogramov) pomocou programu Snuffler postupne načítané, vizualizované a spracované. Pre lepšiu orientáciu v seizmogramoch bol použitý frekvenčný filter (Butterworthov filter tretieho stupňa), ktorý z pôvodnej časovej rady prepúšťal len frekvencie v rozsahu 1-24 Hz (Obrázok 18, vpravo dole). Takéto rozmedzie frekvencií je vhodné pre použitie na poskytnutých dátach. Na základe toho všetkého bola pourčovaná prvotná polarita P-vln (t. j. v čase ich príchodu k stanici) pre jednotlivé stanice, ktorá bola zaznamenávaná do predpripravených vstupných súborov pre FOCMEC. V prípade zaznamenania polarít je už takýto súbor (Obrázok 18, vľavo) pripravený k použitiu FOCMEC-om (kapitola Metodika). Neraz je však takéto určovanie polarít niektorej zo staníc nejednoznačné, čo mohlo byť spôsobené napríklad blízkosťou stanice k nodálnej rovine. V takýchto prípadoch boli napríklad pokusy buď o dvojaké vyhodnotenie ohniskového mechanizmu, t. j. raz so zadanou jednou a následne zas opačnou polaritou, pričom do úvahy bolo brané riešenie lepšie zapadajúce do celkového regionálneho



Obrázok 18: Vľavo – ukážka hotového vstupného textového súboru pre FOCMEC pre jeden jav, aj s vyznačenými polaritami prvých príchodov P-vĺn. Vpravo (Snuffler) – seizmogramy staníc, na základe ktorých boli tieto polarity určované (červené značky ukazujú na časy príchodu). „Vlnka nahor“ za takouto značkou indikuje polohu stanice v oblasti kompresie, „vlnka nadol“ v oblasti dilatácie. Vpravo dole si možno všimnúť aj používaný frekvenčný filter.

kontextu (ak vôbec nejaké FOCMEC našiel) alebo takáto stanica jednoducho nebola braná do úvahy, čo v prípade dostatočného počtu dát veľmi neprekážalo. Možnosťou bolo aj označiť polaritu ako „nejasnú kladnú/zápornú“. Teda v prípade, ak by daná stanica ležala blízko nodálnej roviny a riešeniu by viac vyhovovalo, ak by bola jej polarita opačná, tak by pri vytyčovaní nodálnej roviny za opačnú považovaná bola. Ďalším problémom zvyklo byť to, že k dátam v katalógu neboli vždy dostupné prislúchajúce seizmogramy a opačne. Neraz sa teda stalo, že po prvotnej filtrácii v rámci katalógu boli vybrané pre prácu potenciálne prínosné zemetrasenia, ale pre mnoho chýbajúcich seizmogramov napokon určovanie mechanizmov vyšlo navnivoč.

Záverom ešte pár slov o vstupnom súbore pre FOCMEC. Pre každý určovaný jav je potrebný samostatný vstupný súbor, ktorý okrem ľubovoľnej hlavičky musí pre každú stanicu obsahovať nasledovné informácie. Názov stanice, azimut (definovaný polohou ohniska zemetrasenia a stanice) a uhol východu. Spôsob výpočtu posledných dvoch menovaných parametrov je možné vyčítať z funkcie *focmecInput.m* v Prílohe 2. Dodám však, že vzhľadom na veľký nepomer medzi hĺbkou hypocentier a nadmorskými výškami seizmických staníc, bola vertikálna zložka polôh staníc zanedbávaná, t. j. dávaná rovná nule. Nutná je aj bližšia zmienka o spôsobe výpočtu uhla východu. Pri jeho určovaní bol totižto použitý homogénny rýchlostný model a nie 1D rýchlostný model, ako je tomu zvykom. A to na základe rady školiteľa práce, že vzhľadom na rozlišovaciu schopnosť FOCMEC-u to nemá zásadný význam, nakoľko výsledky oboch modelov by si v daných podmienkach boli do značnej miery podobné.

6 Metodika

Konečné vyhodnocovanie a vykresľovanie možných ohniskových mechanizmov prebiehalo pomocou voľne dostupného softvéru FOCMEC (FOCal MEChanism Determinations), napísaného v jazyku Fortran. Je možné ho ovládať buď prostredníctvom príkazového riadku alebo pomocou skriptov. Prvá verzia tohto programu pochádza z roku 1984 (Snoke et al., 1984).

Program vyžaduje vstupné dáta v podobe textového súboru, ktorý musí obsahovať označenia staníc, azimuty (definované polohou hypocentier a staníc) a uhly východu. Ďalšími parametrami sú prvotné polarizácie P-vĺn, ktoré môžu byť doplnené pomermi amplitúd P, S vertikálnych a S horizontálnych vĺn (P, SV a SH) v čase príchodu. V prípade prítomnosti týchto pomerov už polarizácie P-vĺn nie sú nutné. Od ne/prítomnosti spomenutých pomerov sa odvíja aj proces zadávania vstupných parametrov. Po spustení programu a načítaní vstupného súboru je užívateľ v prípade P-vĺn vyzvaný aj k určeniu maximálnej prípustnej chyby pri polaritách. Mne osobne to pomohlo napr. v prípade nahustenia staníc okolo predpokladanej nodálnej roviny, kedy, čisto číselne vzaté, nebolo možné medzi nimi preložiť nodálnu rovinu. Po zadaní prípustnej chyby sa pri výpočte vytvoril priestor na manipuláciu s touto rovinou (podrobnosti nižšie). Umožnilo to napr. do kompresného sektora zahrnúť aj veľmi blízku stanicu s už mierne opačnou polaritou. Pripustenie a zohľadnenie dvoch ďalších typov chýb je možné v prípade používania pomerov amplitúd. Ďalším zadávaným parametrom, hodným spomenutia, je aj definovanie oblasti v projekčnej rovine, kde sa majú riešenia hľadať. Po úspešnom zadaní všetkých požadovaných parametrov program systematicky skúša zhodu dát so všetkými prípustnými kombináciami azimutu, sklonu plochy a uhla sklzu v zadanom kroku (prednastavená hodnota je 5°). Najvhodnejšie riešenie je také, pri ktorom sa každá zadaná polarita stanice zhoduje s testovaným mechanizmom. Súčet nezhodných polarít je teda nula. Avšak napríklad v blízkosti nodálnych rovín nemusí byť jednoduché nájsť takúto zhodu. Preto možno zadať prípustný počet nezhôd. Ďalšou, síce na zadávanie jednoduchou, ale vo svojej podstate komplikovanejšou možnosťou je aj váženie takýchto nezhodných polarít váhami. Tie sú určované na základe polohy jednotlivých staníc voči hypocentru a s tým súvisiacou vyžarovacou charakteristikou zdroja. V prípade, že dôjde k nezhode polarít a stanica leží niekde uprostred predpokladanej zóny kompresie či dilatácie, tak váha bude blízka jednotke. Naopak, ak stanica leží v blízkosti nodálnej roviny, kde je vyžarovanie slabé, tak váha bude blízka nule. V tomto režime budú programom akceptované tie riešenia, pri ktorých súčet takto vážených nezhôd nepresiahne užívateľom zadanú hodnotu.

Výsledné možné riešenia ohniskových mechanizmov zapíše do dvoch výstupných súborov. Jeden z nich je stručnejší a pre každé riešenie obsahuje orientáciu a sklon jednej z nodálnych rovín, spolu s jej prislúchajúcim uhlom sklzu. Z týchto dát možno dopočítať druhú nodálnu rovinu a vykresliť tak výsledný „beachball“. Program na takéto vykresľovanie (s názvom *focplt*, vykreslené riešenia sú vo formáte .sgf) je jednou z ďalších súčastí FOCMEC-u. Druhý z výstupných súborov je obsiahlejší a obsahuje bližšie podrobnosti o riešeníach, ktoré si účely tejto práce nevyžadovali (Snoke, 2017 a konzultácie so školiteľom).

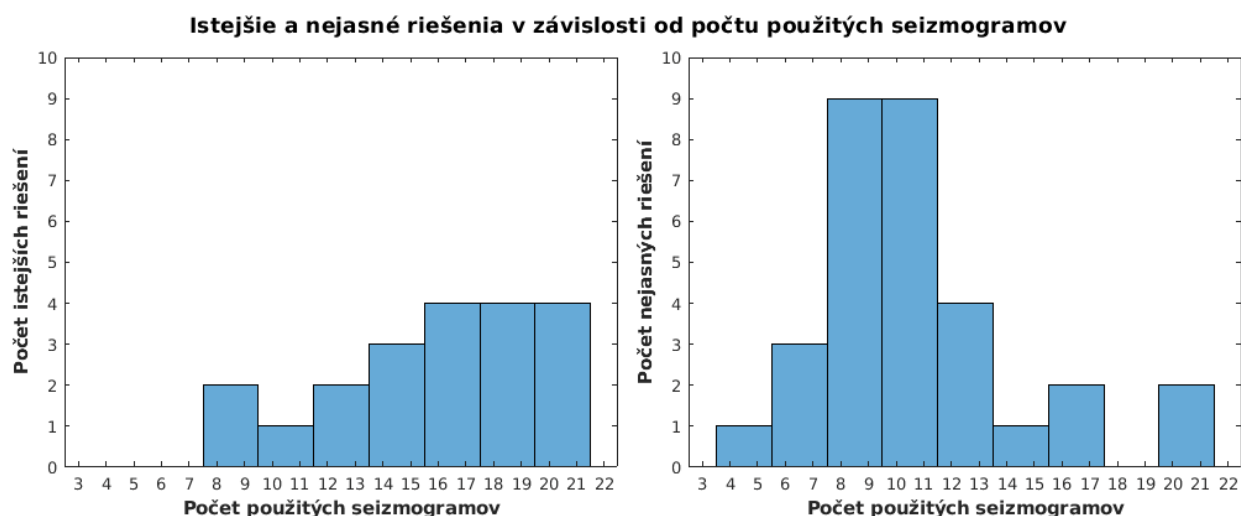
7 Výsledky

Početné zhrnutie konečných výsledkov je obsiahnuté v Tabuľke 1. Ako istejšie riešenia sú označené tie, pri ktorých určovaní sa stretla vhodná kombinácia priaznivých faktorov. A to konkrétne dostatočné pokrytie stanicami, dostupnosť seizmogramov a ich čitateľnosť, ale aj výskyt riešení v rozumne úzkom rozmedzí. Podrobnejšie informácie o týchto riešeniach sa nachádzajú v Prílohe 3. Do kategórie nejasných riešení spadajú tie výsledky, ktoré boli buď otázne alebo úplne neinterpretovateľné.

Podoblast'	Počet určovaných ohniskových mechanizmov	Počet istejších riešení	Počet nejasných riešení
A (stred)	15	11	4
B (východ)	15	4	11
C (juh)	14	3	11
D (sever)	7	2	5
Celkom	51	20	31

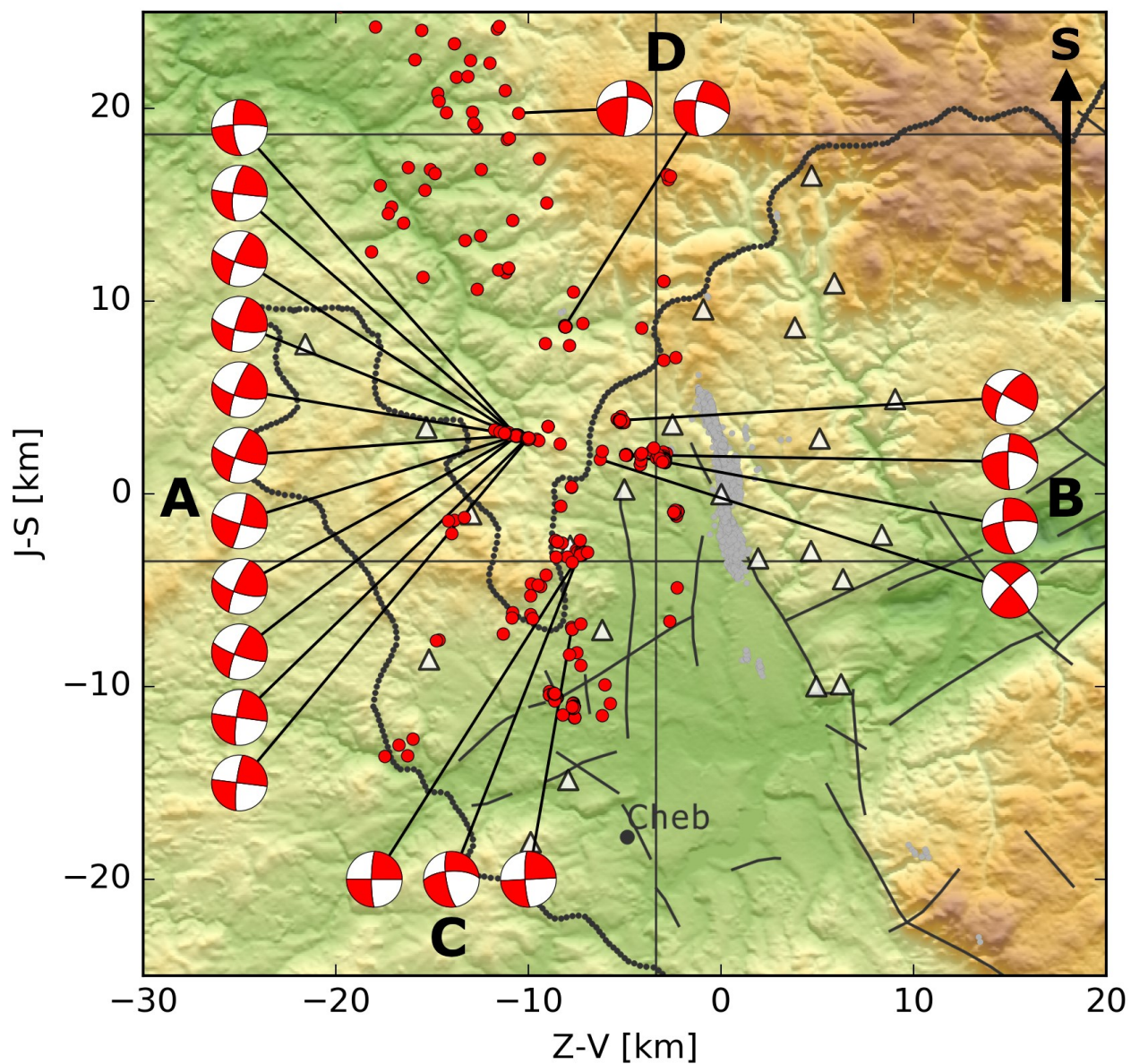
Tabuľka 1: Štatistika určovaných mechanizmov pre jednotlivé podoblasti. Počty riešení sú rozčlenené do dvoch podskupín, s ohľadom na vierohodnosť výsledkov.

Z histogramov na Obrázku 19 vyplýva, že kvalita riešení bola výrazne podmienená množstvom použitých seizmogramov. Pre dosiahnutie istejšieho riešenia bolo potrebné využiť minimálne osem seizmogramov.

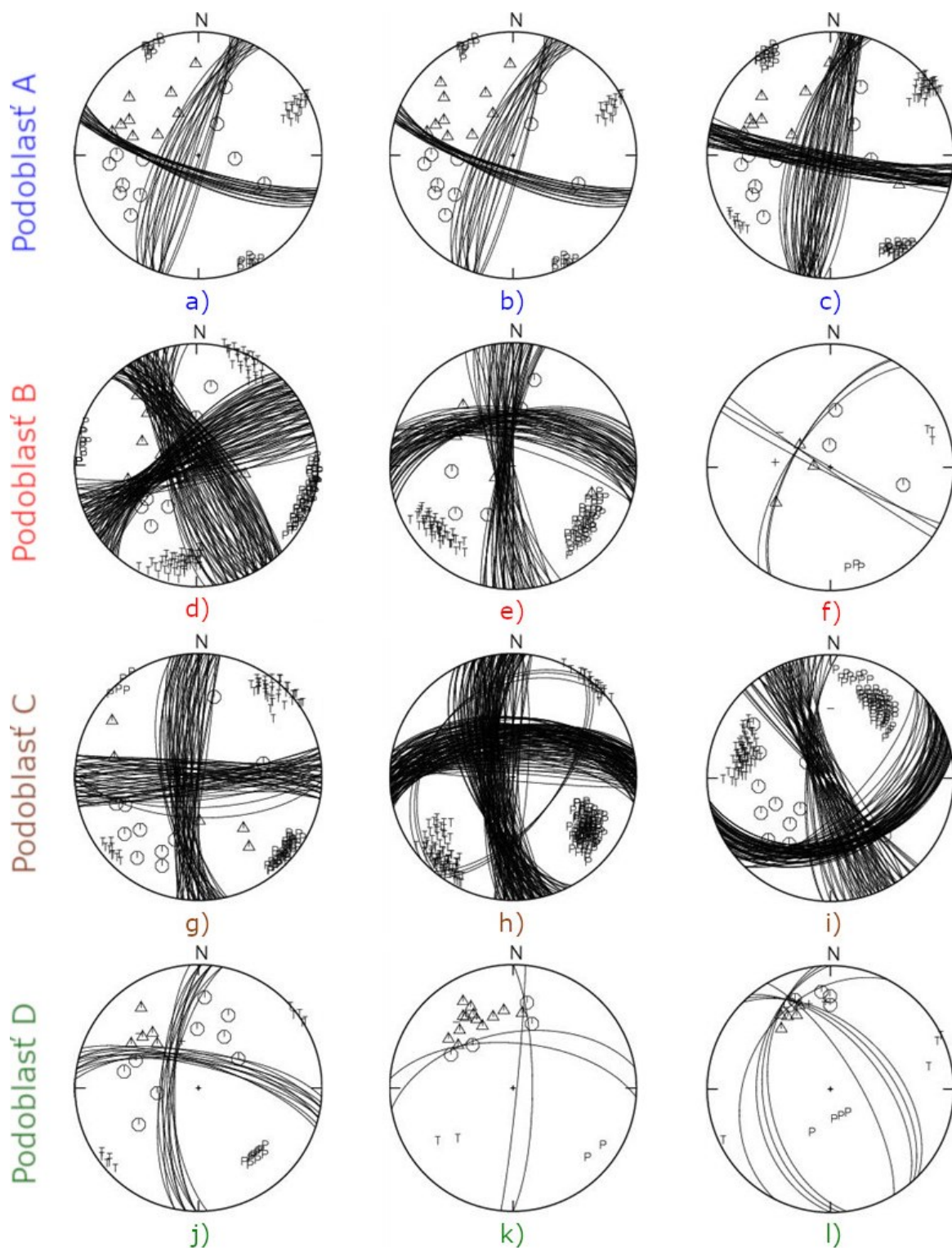


Obrázok 19: Histogramy znázorňujúce počet istejších (vľavo) a nejasných (vpravo) riešení v závislosti od počtu použitých seizmogramov. Je zrejmé, že so stúpajúcim množstvom staníc rastie pravdepodobnosť úspechu pri určovaní mechanizmu. Pre získanie úspešného riešenia bolo potrebných minimálne 8 seizmogramov. Je potrebné brať do úvahy, že grafy nezohľadňujú kvalitu azimutálneho pokrytia stanicami.

Mapa na Obrázku 20 ponúka pohľad na mechanizmy označené ako istejšie riešenia.



Obrázok 20: Prehľad výsledných „beachballov“, zaradených do kategórie istejšie riešenia. Epicentrá zemetrasení z vedľajších/hlavných zdrojových oblastí sú vyznačené červenými/šedými bodkami, biele trojuholníky predstavujú seizmické stanice. Na každom z okrajov mapy sú zobrazené mechanizmy prislúchajúce výlučne k označenej podoblasti A-D (Obrázok 10).

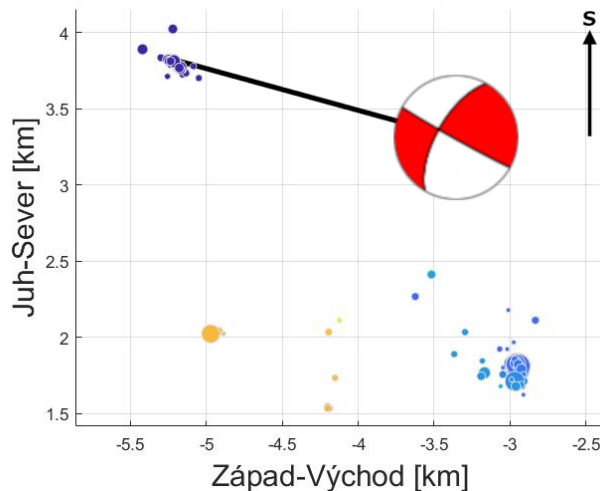


Obrázok 21: Výber z istejších aj nejasných riešení, získaných FOCMEC-om. Každá podoblast' A-D (v riadkoch) je reprezentovaná trojicou mechanizmov. Osemuholník/trojuholník vyznačuje priemet polohy stanice, a to konkrétne v oblasti kompresie/dilatácie. Každá línia predstavuje jedno riešenie. N značí sever a P/T kompresnú/tenznú os. Zaujímavými sú skoro úplne totožné mechanizmy (a) a (b), určené z časovo aj priestorovo blízkych otarasov. (i) ukazuje prípad, kedy boli k dispozícii stanice len z oblasti kompresie a riešenie tak nebolo zaradené k tým istejším. (l) predstavuje nevierohodný výsledok pokusu o určenie vzdialeného zemetrasenia s $M_L = 2.2$. Dokladuje vplyv vzdialenosti hypocentra od seizmickej siete a excentricity voči nej.

8 Diskusia

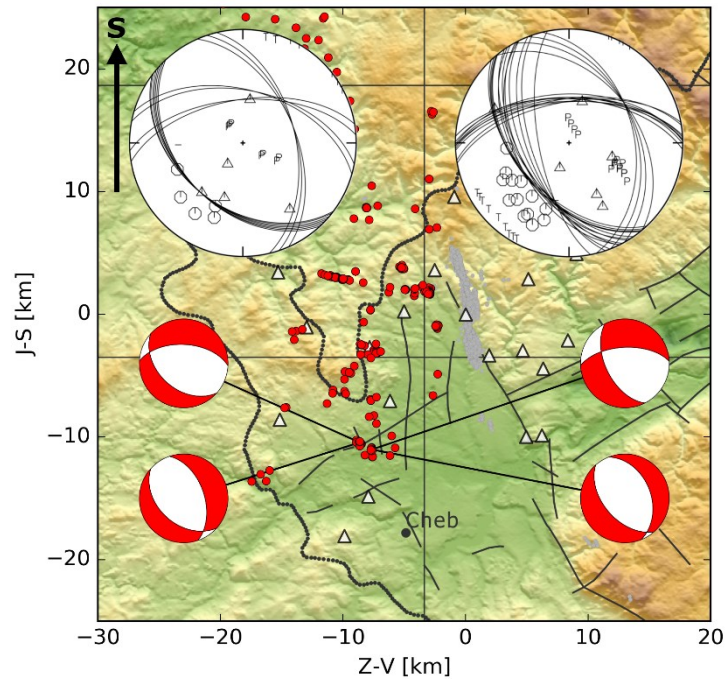
V podoblasti A sa aj po pohľade na rozloženie hypocentier dá prikloniť k záveru, že študované pohyby sú horizontálne a takmer výlučne ZSZ-VJV smeru. Dochádza k nim na subvertikálnej, niekedy až vertikálnej zlomovej ploche. V prípade mechanizmov naznačujúcich subvertikálne pohyby možno smer jej úklonu odhadnúť na JJZ (Obrázky 20 a 21a-c). O dobrom pokrytí stanicami, dostupnosti dát a dostatku dostatočne silných otrasov svedčí aj vysoký pomer vierohodných riešení (Tabuľka 1). Čo sa týka vzťahu k doposiaľ zaznamenaným hlavným pohybom v Novokosteleckej zóne, tak takéto pohyby v nej zaznamenané neboli (Obrázok 8).

Podoblasť B vykazuje výrazne nižšiu mieru úspešnosti určovania mechanizmov v porovnaní s podoblasťou A. A to napriek najpriaznivejšej polohe voči seizmickej sieti. Svoj podiel na tom má aj zlá dostupnosť seizmogramov v roku 2015, kedy došlo k väčšine tu pozorovaných otrasov. Vyvodenie záveru o charaktere miestnych pohybov komplikuje aj fakt, že na tejto relatívne malej ploche (a v súbore len štyroch istejších riešení) možno pozorovať až tri druhy ohniskových mechanizmov (Obrázky 20 a 21d-f). Vo všetkých prípadoch sa jedná o horizontálne pohyby. Riešenie na Obrázku 21d nezodpovedá známym posuvom na okolitých zlomoch, ani v Novokosteleckej zóne (Obrázok 8). Druh mechanizmu na Obrázku 21e môže indikovať pohyb podobný tým, ktoré sa odohrali v Podoblasti A. Jeho vierohodnosť je posilnená faktom, že v danom klasteri vyšli dve značne podobné riešenia. Zaujímavosťou je, že v týchto dvoch prípadoch boli seizmogramy čitateľné aj napriek veľmi nízkym magnitúdám (0.1 a 0.2). Istejšie možno zrejme určiť aj pohyb v hypocentre zemetrasenia na Obrázkoch 21f a 22. Jeho riešenie nevychádza z veľkého počtu staníc. Avšak pri 3D pohľade na klaster v ktorom sa nachádza vidno, ako ohniská vymedzujú vertikálnu plochu s JV-SZ azimutom (Obrázok 22). Táto skutočnosť poukazuje na jednu z nodálnych rovín vo výslednom mechanizme.



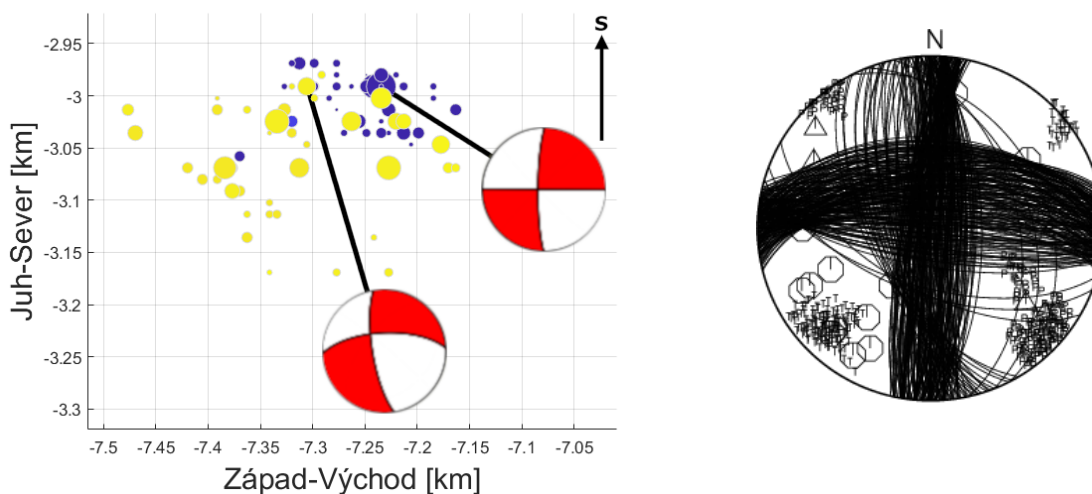
Obrázok 22: Mapový pohľad na podoblasť B. „Beachball“ predstavuje riešenie na Obrázku 21f, ktoré je v súlade s predpokladanou orientáciou zlomovej plochy, zmapovanej na základe relokovaných zemetrasení

V južných klastroch podoblasti C neboli nájdené istejšie riešenia. Nevyskytli sa však ani výraznejšie indície horizontálnych pohybov. Namiesto toho boli indikované skôr poklesy, riešenia ale neboli dostatočne jednoznačné, ako je to vidieť na Obrázku 23. Zobrazené sú na ňom dva mechanizmy blízkych javov. Pre každý z nich sú vykreslené dve možné interpretácie riešení z FOCMEC-u. V oboch prípadoch sa jedná o poklesy.



Obrázok 23: Výber z výsledkov v podoblasti C (južné klastre). Ľavá aj pravá strana obsahujú po jednom riešení. Pre každé zemetrasenie boli vykreslené dva možné „beachbally“, vyplývajúce z výstupu z FOCMEC-u (hore). Magnitúda javov dosiahli 0,7 (vľavo) a 1,4 (vpravo).

Severný klaster podoblasti C poskytol dve podobné riešenia v podobe horizontálnych posuvov (Obrázky 20, 21h a 24). Pohyb nastal zhruba v J-S alebo Z-V smere. To je ale v možnom rozpore s tým, čo naznačuje predpokladaný tvar zlomovej plochy, určený na základe rozloženia okolitých hypocentier. Jej priebeh sa totiž zdá byť s orientáciou JV-SZ, so SV smerom sklonu (Obrázok 16). Mimo týchto dvoch zón sa podarilo získať len jedno spoľahlivejšie riešenie (Obrázky 20 a 21g). Ku každému riešeniu v tejto podoblasti sa dá priradiť niektoré veľmi podobné z Podoblasti A.



Obrázok 24: Mapový pohľad na severný klaster podoblasti C (vľavo). „Beachball“ v ľavej časti mapy predstavuje riešenie na Obrázku 21h. Jav je vyznačený modrou farbou, avšak na rovnakom mieste bolo zlokovaných viacero zemetrasení, ktoré ho pokrývajú. Tieto dve riešenia svojim azimutom zhruba zodpovedajú orientácii zlomovej plochy, odhadnutej z rozloženia relokovaných hypocentier. K „beachballu“ viac napravo prislúcha výstup z FOCMEC-u v pravej časti celého obrázka. Hoci riešenie nie je úplne jednoznačné, bolo ešte priraditeľné k tým istejším.

Možnosti štúdia mechanizmov v Podoblasti D boli najobmedzenejšie, o čom jasne vypovedá aj Tabuľka 1. Početnosť a kvalita získaných výsledkov tu neumožňujú detailnejšiu interpretáciu. Vyšli dve istejšie riešenia (Obrázok 20), pričom vierohodnejším sa zdá byť to na Obrázku 21j. Druhým z nich je to na Obrázku 21k. V tomto prípade je už ale zrejmý výraznejší vplyv vzdialenosti zdroja od seizmickej siete. Otázne je aj použitie homogénneho rýchlostného modelu pri výpočte uhla východu. V oboch prípadoch možno znovu badať podobnosť s Podoblastťou A. Pravdepodobná zlomová plocha tu už ale neupadá na JJZ, ale v smere S až SSV.

9 Záver

Celkový výsledok našej analýzy možno zhrnúť do troch hlavných bodov. Po prvé, vo všetkých sledovaných podoblastiach dochádza v drvivej miere k horizontálnym pohybom (Obrázok 20). Po druhé, jedinou štruktúrou s dôveryhodne popísanou kinematikou je tá v Podoblasti A, nakoľko sa ju podarilo podchytiť vyše desiatkou kvalitných a vzájomne podobných riešení. Potvrdilo sa, že tam došlo k horizontálnym pohybom ZSZ-VJV smeru, ktoré sa odohrali na subvertikálnej, až vertikálnej zlomovej ploche. Takéto posuvy, hoci nie v takom počte, sa podarilo zaznamenať aj v ostatných podoblastiach. A po tretie, nájdených bolo aj zopár mechanizmov, indikujúcich pohyby nesúladné s prevládajúcimi horizontálnymi (diskutované južné klastre v podoblasti C).

Softvér FOCMEC sa ukázal ako relatívne jednoduchý, ale zato veľmi efektívny nástroj na určovanie ohniskových mechanizmov. S jeho pomocou sa podarilo nielen potvrdiť niektoré domnelé trendy (predovšetkým v podoblasti A), ale aj vytypovať nové vhodné lokality pre prípadné ďalšie, podrobnejšie štúdium (podoblasti B a C). Osvedčil sa aj program Snuffler, ktorý bol za daných podmienok nedoceniiteľným nástrojom pri práci so seizmogramami.

Pre zlepšenie dosiahnutých výsledkov by bolo vhodné doplnenie dát seizmogramami zaznamenanými na nemeckej strane hraníc. Tie by totiž významným spôsobom zlepšili azimutálne pokrytie skúmanej oblasti. Ďalšou možnosťou je určovanie mechanizmov na základe pomerov amplitúd P, SV a SH vln vo FOCMEC-u alebo aj využitie úplne iných, sofistikovanejších metód.

10 Zoznam citovanej literatúry

- Babuška, V., Plomerová, J., Fischer, T.,** 2007. Intraplate seismicity in the western Bohemian Massif (central Europe): a possible correlation with a paleoplate junction. *Journal of Geodynamics* 44, 149-159.
- Bankwitz, P., Schneider, G., Kämpf, H., Bankwitz, E.,** 2003. Structural characteristics of epicentral areas in Central Europe: Study case Cheb Basin (Czech Republic). *Journal of Geodynamics* 35(1-2), 5-32.
- Bormann, P., Bergman, E.,** 2000. The New IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice. *Seismological Research Letters* 71, 5, 510-518.
- Dahm, T., Horálek, J., Šílený, J.,** 2000. Comparison of absolute and relative moment tensor solutions for the January 1997 West Bohemia earthquake swarm. *Studia Geophysica et Geodaetica* 44, 233-250.
- Fischer, T., Horálek, J.,** 2005. Slip-generated patterns of swarm microearthquakes from West Bohemia/Vogtland (central Europe): evidence of their triggering mechanism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110, B05S21.
- Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bräuer, K., Kämpf, H.,** 2014. Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review. *Tectonophysics* 611, 1-27.
- Geissler, W. H., Kämpf, R., Kind, K., Klinge, T., Plenefisch, T., Horálek, J., Zedník, J., Nehybka, V.,** 2005. Seismic structure and location of a CO₂ source in the upper mantle of the western Eger rift, Central Europe. *Tectonics* 24, TC5001.
- Hainzl, S., Fischer, T., Čermáková, H., Bachura, M., Vlček, J.,** 2016. Aftershocks triggered by fluid intrusion: Evidence for the aftershock sequence occurred 2014 in West Bohemia/Vogtland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121, 2575-2590.
- Heimann, S., Kriegerowski, M., Isken, M., Cesca, S., Daout, S., Grigoli, F., Juretzek, C., Megies, T., Nooshiri, N., Steinberg, A., Sudhaus, H., Vasyura-Bathke, H., Willey, T., Dahm, T.,** 2017. Pyrocko - An open-source seismology toolbox and library. V. 0.3. GFZ Data Services.
- Heuer, B., Geissler, W. H., Kind, R., Kämpf, H.,** 2006. Seismic evidence for asthenospheric updoming beneath the western Bohemian Massif, central Europe. *Geophysical Research Letters* 33, L05311.
- Horálek, J., Šílený, J.,** 2013. Source mechanisms of the 2000 earthquake swarm in the West Bohemia/Vogtland region (Central Europe). *Geophysical Journal International* 194, 979-999.
- Hrubcová, P., Geissler, W. H., Bräuer, K., Vavryčuk, V., Tomek, Č., Kämpf, H.,** 2017. Active magmatic underplating in western Eger Rift, Central Europe. *Tectonics* 36, 2846-2862.
- Hrubcová, P., Šroda, P., Špičák, A., Guterch, A., Grad, M., Keller, G. R., Brueckl, E., Thybo, H.,** 2005. Crustal and uppermost mantle structure of the Bohemian Massif based on CELEBRATION 2000 data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110, B11305.

- Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Boušková, A., Horálek, J.,** 2013. Moho depth determination from waveforms of microearthquakes in the West Bohemia/Vogtland swarm area. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 188, 120-137.
- Jakoubková, H., Horálek, J., Fischer, T.,** 2017. 2014 mainshock-aftershock activity versus earthquake swarms in West Bohemia, Czech Republic. *Pure and Applied Geophysics* 175, 109-131.
- Kämpf, H., Geissler, W. H., Bräuer, K.,** 2007. Combined gas-geochemical and receiver function studies, of the Vogtland/NW-Bohemia intraplate mantle degassing field Central Europe. In: Ritter, J.R.R., Christiansen, U.R. (Eds.), *Mantle Plumes – A Multidisciplinary Approach*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 127-158.
- Knett, J.,** 1899. Das Erzgebirgische Swarmbeben zu Hartenberg vom 1 Jänner bis Feber 1824. *Sitzungsberichte des deutschen naturwissenschaftlich-medicinischen Vereines für Böhmen „Lotos“ in Prag N.F.* 19, 167-191.
- Leydecker, G.,** 2011. Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. *Geologisches Jahrbuch, Reihe Geophysik* 59, 1-198.
- Matte, P., Maluski, H., Rajlich, P., Franke, W.,** 1990. Terrane boundaries in the Bohemian Massif: result of large-scale Variscan shearing. *Tectonophysics* 177, 151-170.
- Mrlina, J., Kämpf, H., Geissler, W. H., van den Bogaard, P.,** 2007. Proposed Quaternary maar structure at the Czech/German boundary between Mýtina and Neualbentreuth (western Eger Rift, Central Europe): geophysical, petrochemical and geochronological indications. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 35, 213-230.
- Neunhöfer, H., Hemmann, A.,** 2005. Earthquake swarms in the Vogtland/Western Bohemia region: spatial distribution and magnitude-frequency distribution as an indication of the genesis of swarms? *Journal of Geodynamics* 39, 361-385.
- Prodehl, C., Mueller, St., Haak, V.,** 1995. The European Cenozoic rift system. *Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics*. In: Olsen, K.H. (Ed.), *Developments in Geotectonics* 25. Elsevier, 133-212.
- Shearer, P. M.,** 2009. *Introduction to Seismology* (second edition). Cambridge University Press, New York.
- Snoke, J. A.,** 2003. FOCMEC: FOcal MECHANism determinations. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* (W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Eds.), Academic Press, San Diego, (Part B: pp. 1629-1630 and accompanying CD).
- Snoke, J. A.,** 2017. FOCMEC: FOcal MECHANism Determinations. http://ds.iris.edu/pub/programs/focmec/focmec_manual.pdf.
- Snoke, J. A., Munsey, J. W., Teague, A. C., Bollinger, G. A.,** 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV -P amplitude ratio data. *Earthquake Notes* 55, #3, 15.
- Stein, S., Wysession, M.,** 2003. *An Introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure* (first edition). Blackwell Publishing Ltd.

- Šílený, J., Horálek, J.,** 2016. Shear-tensile crack as a tool for reliable estimates of the non-double-couple mechanism: West Bohemia-Vogtland earthquake 1997 swarm. *Physics and Chemistry of the Earth* 95, 113-124.
- Špičák, A.,** 1987. Fault plane solutions of 1985 Dec. 21 and 1986 Jan. 20 events. In: Procházková, D. (Ed.), *Earthquake Swarm 1985/86 in Western Bohemia*. Geophysical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, Praha, 268-273.
- Thybo, H., Artemieva, I. M.,** 2013. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere. *Tectonophysics* 609, 605-619.
- Vavryčuk, V., Adamová, P.,** 2018. Detection of stress anomaly produced by interaction of compressive fault steps in the West Bohemia swarm region, Czech Republic. *Tectonics* 37, 4212-4225.
- Vylita, T., Žák, K., Cílek, V., Hercman, H., Mikšíkova, L.,** 2007. Evolution of hot-spring travertine accumulation in Karlovy Vary/Carlsbad (Czech Republic) and its significance for the evolution of Tepla valley and Ohre/Eger rift. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 51, 427-442.
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. L.,** 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, 6, 1353-1368.

11 Prílohy

K tejto práci patria dve elektronické prílohy v podobe MATLAB-súborov (Prílohy 1 a 2) a tabuľka obsahujúca bližšie podrobnosti o istejších riešeniach (Príloha 3).

Príloha 1

Slúži na rýchlu a jednoduchú vizualizáciu dát, s ktorými bolo narábané v tejto práci. Pozostáva zo skriptu s názvom *plotsScript.mat* a k nemu prislúchajúcich dátových súborov. Bližšie informácie možno nájsť v komentároch skriptu.

Príloha 2

Obsahuje všetky súčasti filtra seizmických dát v takej podobe, v akej boli predstavené v kapitole Spracovanie. Hlavným súborom je skript *filterMain.m*, kde sa nastavujú vyhľadávacia kritériá a podobne. Pre úplnosť ešte treba zdôrazniť, že tento filter vznikol až počas písania práce, reflektujúc aktuálne požiadavky. Preto mu chýba ucelený koncept a pri jeho prípadnom čítaní sa mnoho vecí môže javiť zbytočne ťažkopádny.

Príloha 3

Dátum	Čas	X [km]	Y [km]	Hĺbka [km]	Magnitúdo	Azimut [°]	Sklon [°]	Sklz [°]	Počet staníc
2007-02-18	01:03:47.58	-7.3057	-2.9911	5.953	0.9	170.43	75.02	-24.99	17
2007-02-19	23:29:09.52	-7.2345	-2.9911	6.039	1.6	180.42	81.69	0	17
2007-12-20	06:43:25.47	-6.2803	1.7902	14.018	1.3	316.79	80.02	9.25	14
2009-11-22	06:31:22.28	-10.5313	19.7593	16.934	1.2	2.87	82.4	34.09	18
2010-01-23	20:16:21.32	-10.6453	3.0467	10.695	1.7	175.64	72.28	-9.07	14
2010-01-24	00:58:03.15	-10.5954	3.0356	10.695	1.6	196.02	80.15	19.34	15
2010-09-09	19:26:46.08	-8.1032	8.6954	13.8	1.5	185.9	71.11	-19.66	17
2011-02-25	05:00:35.14	-10.5669	3.0245	10.614	1.6	202.14	79.2	19.97	18
2011-03-05	04:21:52.59	-7.7543	-7.0053	7.698	0.5	176.96	80	0	16
2011-03-05	21:09:31.54	-10.5741	3.0245	10.601	0.8	201.82	78.56	11.79	19
2011-03-11	22:50:40.04	-10.5741	3.0356	10.583	1.4	201	80.57	12.11	20
2011-03-12	03:19:56.36	-10.5384	3.0356	10.698	1	14.95	85.17	-8.68	21
2011-03-20	21:37:46.04	-10.6524	3.0467	10.642	1.5	188.05	70.98	2.58	21
2011-03-23	07:04:33.44	-10.631	3.0356	10.678	0.9	201.23	79.45	13.06	20
2011-03-30	14:08:48.48	-10.5883	3.0356	10.63	1.2	200.19	80.15	19.83	13
2015-03-22	10:16:42.96	-5.2123	3.814	13.759	0.5	210	65.1	2.33	8
2015-04-21	19:30:51.08	-10.0186	2.8688	10.267	1	186.99	81.46	0	10
2015-04-30	09:12:00.84	-10.0827	2.8799	10.239	1.6	188.05	81.15	0.44	18
2016-01-10	23:27:19.66	-4.9417	2.0349	11.433	0.2	170.08	73.33	-14.7	9
2016-01-15	04:05:12.16	-4.9488	2.0349	11.445	0.1	180.55	84	-29.15	12

Tabuľka 1: Detailnejšie údaje o mechanizmoch z kategórie istejších riešení. Počiatok súradnej sústavy je pod obcou Nový Kostel. Hodnoty azimutu, sklonu a sklzu predstavujú vždy len jednu z nodálnych rovín výsledného mechanizmu. Nemusí sa tu teda jednať o predpokladanú zlomovú plochu. Avšak pri znalosti tejto trojice parametrov pre jednu nodálnu rovinu, je možné tú druhú dopočítať.